



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사학위논문

충격량에 따른 풍화토 비산량의 예측과
확산 특성 분석

Estimation of Dust Emission by Impact on Weathering
Soil and Analysis of Dispersion Characteristic

2014년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부
지역시스템공학전공
민슬기

충격량에 따른 풍화토 비산량의 예측과
확산 특성 분석

Estimation of Dust Emission by Impact on Weathering
Soil and Analysis of Dispersion Characteristic

지도교수 손 영 환
이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함

2014년 8월

서울대학교 대학원
생태조경·지역시스템공학부 지역시스템공학전공
민 슬 기

민슬기의 공학석사학위논문을 인준함
2014년 8월

위 원 장

李 政 宰



부 위 원 장

孫 暎 歡



위 원

李 寅 韻



국문초록

미세먼지는 인체에 유해한 물질중 하나로 인체뿐만 아니라 농작물 및 가축에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다. 이에 따라 비산먼지 발생 가능성이 높은 흙에서의 풍식량 및 비산먼지 발생량을 추정하고자 하는 연구가 진행되었으나 외부 충격에 의해 생성된 비산먼지의 발생 특성에 대한 정량적인 분석에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 외부 충격에 의한 발생한 비산먼지의 주변 영향에 대한 높이별, 거리별 확산 특성에 대한 연구도 부족한 상황이다. 이에 따라 본 연구는 흙에서 인간의 활동에 의한 비산먼지 발생 특성 분석을 위해 낙하에 의한 운동에너지 및 낙하 추의 크기를 변화시키면서 비산먼지 발생 특성을 분석하였다. 또한 낙하 충격을 통해 발생한 비산 먼지의 확산 특성을 분석하기 위해 낙하에 의해 발생한 비산먼지에 대한 풍속 및 운동에너지 변화 및 측정 높이, 측정 거리에 따른 비산먼지 발생량을 측정하여 외부 충격에 의한 비산먼지 확산 특성을 분석하였다.

비산먼지 발생량은 운동에너지 증가에 따라 증가하는 경향을 보이지만 단위둘레당 운동에너지가 한계 이상으로 증가하게 되면 오히려 비산먼지 발생량이 감소하는 경향을 나타냈다. 풍속이 존재할 때와 존재하지 않을 때 낙하 충격에 의한 비산먼지의 확산 특성은 다른 것으로 나타났으며, 풍속이 존재하지 않을 경우 가우시안 확산 모델에 의해 비산먼지가 확산하는 것으로 나타났다. 운동에너지가 증가할수록 높이, 거리에 따른 비산먼지 확산량은 증가하는 것으로 나타났다.

본 연구는 외부 충격에 의한 흙에서의 비산먼지 발생 및 확산에 대한 기초연구로, 추후 연구를 통해 비산먼지 및 풍식 발생량 산정에 있어 외부 충격에 대한 요인을 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

주요어 : 풍화토, 낙하 충격, 먼지 발생, 먼지 확산, PM₁₀

학 번 : 2012-23363

목 차

국문초록	i
목차	ii
List of Tables	iv
List of Figures	v
제 1 장 서론	1
제 2 장 연구사	4
2.1 풍식 및 먼지 발생	4
2.2 비산먼지 확산	5
제 3 장 배경 이론	7
3.1 미세먼지	7
3.2 광산란법	10
3.3 가우시안 분포 및 확산 모델	11
제 4 장 재료 및 방법	14
4.1 실험 재료	14
4.2 실험 장비	15
4.3 실험 방법	19
4.3.1 낙하 추의 운동에너지 및 크기에 따른 비산먼지 발생	21
4.3.2 풍속 및 낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산	22
제 5 장 결과 및 고찰	24
5.1 낙하 추의 운동에너지 및 크기에 따른 비산먼지 발생 특성	24
5.1.1 낙하 높이에 따른 영향	24

5.1.2 낙하 추 무게에 따른 영향	25
5.1.3 낙하 추 크기에 따른 영향	26
5.1.4 운동에너지 및 낙하 둘레에 따른 먼지 발생량 추정	28
5.2 풍속 및 낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산 특성	34
5.2.1 풍속 변화에 따른 높이, 거리별 비산먼지 확산 특성	34
5.2.2 낙하 추 무게 변화에 따른 높이, 거리별 비산먼지 확산 특성	42
5.2.3 운동에너지 및 측정 높이, 거리에 따른 비산먼지 확산량 추정	46
제 6 장 결론	50
참고문헌	53
Abstract	57

List of Tables

Table 3.1 PM ₁₀ forecast ratings	8
Table 3.2 Air quality standards by country	9
Table 3.3 Objective criteria and tentative recommendations by WHO	9
Table 4.1 Physical properties of soil	14
Table 4.2 Cases of soil dust emission test	22
Table 4.3 Cases of soil dust dispersion test	23
Table 5.1 Coefficient a, b, c and R ² , RMSE of equation for kinetic energy and perimeter	32
Table 5.2 Coefficient a, b, c, d, e, f and R ² , RMSE of equation for height and distance	40
Table 5.3 Coefficient a, b, c, d, e, f, g, h, i, j and R ² , RMSE of equation for kinetic energy, height and distance	46
Table 5.4 Coefficient a, b, c, d, e, f, g, h, i, j and R ² , RMSE of equation for kinetic energy, height and distance below 3,000µm	48

List of Figures

Fig. 3.1 Relative size of PM_{10} , $PM_{2.5}$	8
Fig. 3.2 Principle of light scattering method	11
Fig. 3.3 Example for gaussian standard distribution	12
Fig. 3.4 The coordinate system of gaussian model and distribution of pollutant diffusion	13
Fig. 4.1 The particle size distribution curve of soil	15
Fig. 4.2 Portable aerosol spectrometer	16
Fig. 4.3 Wooden board and paved soil	16
Fig. 4.4 Weight	17
Fig. 4.5 Wooden plate for weight fixed	17
Fig. 4.6 Pulley for drop test	18
Fig. 4.7 Schematic view of the portable wind tunnel	19
Fig. 4.8 Schematic diagram of soil dust emission test	20
Fig. 4.9 Portable wind tunnel and wooden board for dust dispersion test	21
Fig. 5.1 Relationship between PM_{10} and drop height	24
Fig. 5.2 Relationship between PM_{10} and drop weight	25
Fig. 5.3 Relationship between PM_{10} and drop area	27
Fig. 5.4 Relationship between PM_{10} and drop perimeter	27
Fig. 5.5 Relationship between PM_{10} and kinetic energy per area	30
Fig. 5.6 Relationship between PM_{10} and kinetic energy per perimeter	30
Fig. 5.7 Relationship between the measured and estimated PM_{10} about kinetic energy and perimeter	33
Fig. 5.8 Relationship between PM_{10} and wind speed, measuring height	36
Fig. 5.9 Relationship between PM_{10} and wind speed, measuring distance	36

Fig. 5.10 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 0.0m/s	37
Fig. 5.11 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 1.0m/s	38
Fig. 5.12 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 2.9m/s	38
Fig. 5.13 Relationship between the measured and estimated PM_{10} about measuring height, distance at 0.0m/s	40
Fig. 5.14 Contour graph about Measured and Estimated PM_{10} at 0.0m/s	41
Fig. 5.15 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 3kg	42
Fig. 5.16 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 5kg	43
Fig. 5.17 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 7kg	43
Fig. 5.18 Relationship between PM_{10} and weight, measuring height	44
Fig. 5.19 Relationship between PM_{10} and weight, measuring distance	45
Fig. 5.20 Relationship between the measured and estimated PM_{10} about kinetic energy, measuring height and distance	47
Fig. 5.21 Relationship between the measured and estimated PM_{10} about kinetic energy, measuring height and distance below 3,000 μ m	49

제 1 장 서론

현대 산업사회가 발전하면서 도시로의 인구 집중, 자원 소비 증대에 따라 에너지, 각종 자원 등의 수요가 증가하고 있다. 이러한 활동의 부산물로 폐기물, 매연 등의 물질이 배출되며, 이러한 물질들이 넓은 지역으로 확산됨에 따라 환경오염이 발생하게 된다. 그 중 특히 대기 오염은 다른 오염에 비해 발생 시 영향의 지속성이 크고 피해를 받는 인구가 상대적으로 광범위한 것으로 알려져 있다 (이용진, 2007).

이 중 미세먼지는 여러 대기오염 물질 중 인체에 가장 유해한 물질로 알려져 있으며 (김용표, 2006), 인체뿐만 아니라 농작물 및 가축에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (황현섭 등, 2008; Bitog 등, 2009). 이러한 위험성 때문에 최근 미세먼지에 대한 관심이 증가하고 있으며, 이에 따라 미세먼지에 대한 규제 기준이 전 세계적으로 제정되고 있는 추세이다. 우리나라의 경우 1993년 $10\mu\text{m}$ 보다 작은 입경의 미세먼지인 PM_{10} (Particle Matter $10\mu\text{m}$)에 대한 연간 환경 기준을 제정하였고, 수도권 대기환경 개선에 대한 특별법 제정을 통해 2015년부터 2024년까지 PM_{10} 의 규제를 연평균 $30\mu\text{m}$ 로 강화하고, $2.5\mu\text{m}$ 보다 작은 입경인 초미세먼지 $\text{PM}_{2.5}$ (Particle Matter $2.5\mu\text{m}$)에 대한 규제를 신설할 예정이다. 해외의 경우 미국에서는 현재 PM_{10} 에 대한 기준은 24시간 평균 $150\mu\text{m}$ 이며, $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 기준은 연 평균 $15\mu\text{m}$, 24시간 평균 $35\mu\text{m}$ 로 규정되어 있다. EU의 경우 PM_{10} 은 연평균 $40\mu\text{m}$, 24시간 평균 $50\mu\text{m}$ 이며 $\text{PM}_{2.5}$ 는 연 평균 $25\mu\text{m}$ 기준이 제정되어 있다. 비산먼지의 위해성에 대한 연구가 진행되면서, 대기 중 미세먼지 농도에 대한 규제는 전 세계적으로 강화되고 있는 추세이다 (박해우 등, 2013).

미세먼지는 황사나 산불, 화산폭발, 풍식 등 자연적인 발생원에 의해서도 발생되며 건설공사나 야적 원료 입자의 비산, 운동장에서의 활동

등 인간의 인위적인 활동의 부산물에 의해 발생한다 (최원준 등, 2006). 비산먼지의 대한 환경적 관심이 증가 하면서 비산먼지 발생 가능성이 높은 흙에서의 비산먼지 발생 특성에 대한 연구가 많이 진행되고 있는 추세이다. 풍식 및 비산먼지 발생에 영향을 끼치는 흙의 자연적인 특성에 대한 여러 연구가 진행되었으며 (Zobeck, 1991) 이동식 풍동을 통해 흙에서의 풍식량 및 비산먼지 발생량을 추정하고자 하는 연구가 진행되고 있다 (Etyemezian 등, 2007). 또한 인간의 활동에 따른 비산먼지 발생 영향에 대한 연구는 비포장도로에서의 차량 이동에 따른 비산먼지 발생 특성에 대한 연구가 진행 되고 있는 상황이다 (Etyemezian 등, 2003). 하지만 대부분의 연구는 비산먼지 발생에 대한 자연적인 요인 분석에 초점이 맞춰져 있으며, 인간의 활동에 의한 비산먼지 발생 특성에 대한 연구는 대부분 비포장도로에서의 차량 이동에 관한 연구로, 외부 충격에 의해 생성된 비산먼지의 발생 특성에 대한 정량적인 분석을 수행하지는 않았다.

농촌지역의 경우 대부분의 활동은 흙을 기반으로 이루어지고 있으며, 도시지역의 경우 학교 운동장에서 발생하는 비산먼지가 흙에서 발생하는 비산먼지의 대부분을 차지하고 있다. 학교 운동장의 경우 많은 학생들의 체육활동 등으로 인해 비산먼지가 꾸준히 발생하고 있으며 학교는 대부분 주택밀집지역에 존재하기 때문에 학교 운동장에서 발생한 비산먼지로 인한 민원이 상당수 존재한다. 이러한 비산먼지 발생 특성에도 외부 충격에 의한 비산먼지 발생 특성에 대한 연구는 부족한 실정이다. 또한 외부 충격에 의해 발생된 먼지는 이동 및 확산에 의해 활동하는 사람들에게 흡입되어 건강에 피해를 끼치게 되며, 주변 지역에 악영향을 미치게 된다. 비산먼지 확산에 대한 연구는 많이 진행되어 있으나 실제 비산먼지 발생 현장에서의 주변지역 영향에 대한 높이별, 거리별 비산먼지 확산 특성에 대한 연구는 아직 부족한 상황이다.

따라서 본 연구는 흙에서 인간의 활동에 의한 비산먼지 발생의 정량적인 분석을 위해 낙하에 의한 운동에너지 및 낙하 추의 크기를 변화시

키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 이를 통해 외부 충격에 의한 비산먼지 발생에 영향을 주는 요인을 정량적으로 분석하였으며 낙하 추의 운동에너지 및 크기를 통한 비산먼지 발생량을 추정하였다. 또한 낙하 충격을 통해 발생한 비산 먼지의 확산 특성을 분석하기 위해 낙하에 의해 발생한 비산먼지에 대한 측정 높이, 측정 거리 변화 및 풍속 변화에 따른 비산먼지 발생량을 측정하였다. 이를 통해 운동에너지 변화 및 측정 위치, 측정 거리에 따른 비산먼지 발생량 추정식을 제안하였다.

제 2 장 연구사

2.1 풍식 및 먼지 발생

비산먼지 발생에 영향을 주는 요인 중 자연적인 영향에 의한 토양의 침식 및 먼지 발생에 대한 연구는 1970년대부터 본격적으로 진행되었다.

비산먼지 발생에 영향을 주는 요인 중 입경에 대한 연구로는 Lyles (1988), Liu 등 (1998), 김태완 등 (2013) 의 연구가 있다. Lyles (1988) 는 일반적으로 0.84mm 이상의 토양 입자는 바람에 큰 영향을 받지 않는다고 하였으며, Liu 등 (1998) 은 풍속에 따라 풍식에 영향을 받는 입경이 다르며 풍속이 낮은 경우 작은 입자들이, 풍속이 높은 경우 큰 입자들이 주로 풍식을 받는다는 연구를 진행하였다. 김태완 등 (2013) 은 토양 표층 입경과 풍식된 입자의 입도간의 상관성 분석을 통해 풍식된 입자의 최대, 최소입경을 추정하는 연구를 진행하였다.

함수비 및 토양 표면의 영향에 대한 연구에는 Bolte 등 (2011) 의 토양 표층의 함수비가 4 ~ 4.9% 이하일 경우 풍식으로 인해 토양 입자가 비산하며, 표토의 모관흡수력이 일정 이상인 경우 풍식이 잘 일어나지 않는다는 연구가 있으며, Fister 등 (2009) 은 토양의 표면의 크러스트가 존재할 경우의 풍식량이 다른 상태보다 상대적으로 작은 경향을 보인다는 연구를 진행하였다. Liu 등 (2006) 은 밭의 이랑 높이, 간격 및 풍속 변화에 따라 풍식량을 측정하여 경운 방법에 따른 풍식량 감소 효과를 추정하는 연구를 진행하였다. Zhang 등 (2003) 은 공기역학적 토양 표면 거칠기를 변화시키면서 풍동을 이용, 거칠기와 풍속의 변화에 따른 비산먼지 발생량 변화 분석을 실시하였다.

이러한 자연적인 요인들을 통해 풍식 및 비산먼지 발생량을 예측하고자 하는 연구도 진행되었다. Saxton 등 (2000) 은 특정 지역에서의 풍속,

식생상태, 토양의 거칠기를 통해 PM_{10} 과 풍식량 추정식을 작성하였으며, Hong 등 (2014) 은 이동식 소형 풍동을 이용, 토양 표면의 거칠기와 풍속, 표층의 함수비, 입경 자료 등을 통해 풍식 방정식 계수를 산정, 시뮬레이션을 통해 풍식량을 예측하는 연구를 진행하였다.

비산먼지 발생에 있어 인간의 활동 등 인위적인 영향에 의한 연구는 보통 비포장도로에서 차량의 이동으로 인한 먼지 발생에 대한 연구가 많이 진행되었다. Pinnick 등 (1985) 은 차량에 의해 발생한 먼지와 자연 발생한 먼지의 입경 차이를 비교한 연구를 진행하였고, Kuhns 등 (2003) 은 강수량 및 계절 변화에 따른 포장도로 및 비포장도로의 먼지 발생 특성에 대해 분석하였다. Gillies 등 (2004) 은 차량의 무게와 속도, 주행 거리를 통해 먼지 배출 계수를 산정한 연구를 진행하였고, Williams 등 (2008) 은 차량 이동 속도와 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 사이의 관계 및 먼지의 구성 원소들을 파악하는 연구를 진행하였다.

2.2 비산먼지 확산

비산먼지 확산에 대한 연구에는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 시뮬레이션 및 비산먼지 확산 모델이 많이 이용되었다. CFD 시뮬레이션을 이용한 연구에는 Seo 등 (2010) 의 새만금지역의 비산먼지의 발생량과 CFD를 이용한 예측값의 비교를 통해 비산먼지 확산량 예측 가능성을 파악한 연구가 있다. 최재원 등 (2010) 은 CFD를 이용하여 매립지의 매립 조건 및 기상 조건에 따라 비산먼지 확산 모델링 및 확산 특성을 분석하고 방풍벽 설치에 따른 비산먼지 저감 효과에 대해 분석하였다.

비산먼지 확산 모델을 이용한 연구에는 이내현 등 (2000), 윤배근 등 (2009) 의 연구가 있다. 이내현 등 (2000) 은 대규모 공사시 발생하는 비

산먼지의 발생량과 확산 분석에 대한 영향을 여러 모델을 통해 분석하였으며, 윤배근 등 (2009) 은 비산먼지 발생 및 확산 모델인 AERMOD를 통해 매립공사시 비산먼지 발생량 및 영향에 대한 분석을 실시하였다.

여러 토양 조건 및 기상 조건 의한 비산먼지 발생량 측정 및 확산 특성 분석에 대한 연구도 많이 진행되었다. Wang 등 (2008) 은 발 경운시 발생하는 비산먼지의 확산량을 모델링해 주변 지역에서의 영향을 분석하였으며, 황현섭 등 (2008) 은 새만금에서의 비산먼지 모니터링을 통해 비산먼지의 화학적 성분 및 측정 높이에 따른 입경에 대한 분석을 실시하였다. 또한 박기철 등 (2000) 은 풍동에 모래 파일 및 다공성 방풍펜스를 설치하여 풍속 및 방풍펜스의 다공도에 따라 비산되는 먼지량과 비산거리를 분석하는 연구를 진행하였다.

제 3 장 배경 이론

3.1 미세먼지

미세먼지는 공기 중 고체 상태와 액체상태 입자 (particle) 들을 총칭하여 입자상 물질 또는 에어로졸 (aerosol) 이라고 한다. 이러한 입자들은 자연 배출원 뿐만 아니라 여러 종류의 고정배출원이나 이동 배출원으로부터 배출되므로 여러 형태의 모양과 크기를 가지고 있다. 미세먼지는 배출원으로부터 직접 배출되거나 이산화황이나 질소산화물 (NO_x) 과 같은 가스상 물질에 의해 2차적으로 생성된다. 공기 중에 부유되어 있는 고체나 액체 의 대기환경에서는 PM (Particulate matter) 으로 나타내며 입자크기는 대부분 $0.001 \sim 10\mu\text{m}$ 의 범위이다. 이 정도의 입자크기를 가진 PM은 대부분 사람의 호흡기를 통해서 공기와 함께 흡입 노출될 수 있기 때문에 건강영향 측면에서 중요하다. 미세먼지는 천식과 같은 호흡기계 질병을 악화시키고, 폐 기능의 저하를 초래한다. 또한 미세먼지는 시정을 악화시키고, 식물의 잎 표면에 침적되어 신진대사를 방해하며, 건축물에 퇴적되어 조각된 유적물이나 동상 등에 부식을 일으킨다. 국립환경과학원에서는 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$, 실내 환경에서는 PM_{10} 기준이 있으며, 산업보건 분야에서는 호흡성 분진에 대한 노출기준이 있다 (김성연 등, 2005).

PM_{10} 은 ‘particles less than 10 microns in aerodynamics diameter’의 약자로 호흡기에 흡입되어 축적될 수 있다. 그리고 $\text{PM}_{2.5}$ 는 공기역학적 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하이다. 입자크기가 $2.5 \sim 10\mu\text{m}$ 인 것은 거대입자 (coarse particle) 이며, $2.5\mu\text{m}$ 이하의 입자크기는 미세입자 (fine particle) 라고 한다. $\text{PM}_{2.5}$ 는 폐포까지 흡입되는 크기이므로 건강상 위험이 매우 높다. (김현재 등, 2009).



Fig. 3.1 Relative size of PM₁₀, PM_{2.5}

국내에서는 고농도 대기오염으로 인한 국민 건강 피해를 저감할 수 있도록 전국 단위의 국가 대기오염 예보제가 추진되고 있다. 미세먼지 PM₁₀에 대해 환경부(국립환경과학원)가 예보 주체가 되어 수도권 지역(서울, 인천, 경기) 대상으로 '13년 8월부터 시범예보를 실시하여 점차 전국으로 확대해 나가고 있다. 예보 등급은 대기환경기준과 건강영향을 고려하여 Table 3.1 과 같이 일일 평균을 기초로 5단계로 구분한다.

Table 3.1 PM₁₀ forecast ratings

Section	Good	Mode -rate	Unhealthy	Very unhealthy	Hazardous	
Predicted concentrations ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{day}$)	0~30	30~80	81~120	121~200	201~300	301~
Action tips	—	—	Avoid day-log outdoor activities	Avoid day-log outdoor activities	Restrict outdoor activity	Prohibit outdoor activity

해외 각 국가의 경우 환경기준이 설정되는 대상 물질과 농도 수준은 오염현황, 인체에 미치는 영향 등을 고려하여 정하게 되는데 (Table 3.2), 국가별로 자국의 미세먼지 현황을 고려해 주로 세계보건기구(WHO)의 권고기준을 참고하여 설정한다 (Table 3.3). 우리나라는 WHO 잠정목표 2, 미국·일본은 잠정목표 3에 해당하는 수준이다 (환경부, 2013).

Table 3.2 Air quality standards by country

Entries	Standard time	Korea	US	Japan	UK	EU
PM ₁₀ ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	1hr	–	–	200	–	–
	24hr	100	150	100	50	50
	Year	50	–	–	40	40

Table 3.3 Objective criteria and tentative recommendations by WHO

Entries	Standard time	Objective criteria	Tentative recommendations 3	Tentative recommendations 2	Tentative recommendations 1
PM ₁₀ ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)	24hr	50	75	100	150
	Year	20	30	20	70

3.2 광산란법

광산란법 (Light Scattering Method) 은 대기 중 먼지 입자의 농도를 측정하는 방법 중 하나로, 대기중에 부유하고 있는 입자상물질에 빛을 조사하면 입자상 물질에 의하여 빛이 산란하게 된다. 물리적 성질이 동일한 입자상물질에 빛을 조사하면 산란광의 양은 질량농도에 비례하게 된다. 이러한 원리를 이용하여 산란광의 양을 측정하고 그 값으로부터 입자상 물질의 농도를 구하는 방법이다 (Fig 3.2).

광산란법의 측정장치는 유량계, 공기흡인부, 광전자증배관, 광전류적분기, 타이머, 광원부 등으로 구성되어 있다. 검출기에 있는 흡인장치에 의하여 공기가 광학적 미로를 통과할 때 직각으로 2회 굴절하여 외부광과 큰 입자가 제거되어 암실내를 통과한다. 암실내의 빛 (Beam) 은 수광부와 직각으로 서로 바뀌면서 감응 용적을 구성하게 된다. 입자상물질이 감응 용적내를 통과할 때 개개의 입자상 물질에 의하여 직각 방향의 산란광이 슬릿(Slit)을 통과하여 광전자의 증배관으로 입사되어 광전류로 전환된다. 광전류와 시간을 곱한 값이 일정한 수치에 달할 때 1 펄스(Pulse) 발생하는 광전류 적분회로를 이용하여 산란광에 비례한 펄스로 전환된다. 따라서 단위 시간내에 펄스를 계수함으로써 입자상 물질의 상대 질량농도를 측정할 수 있다 (환경부, 2014).

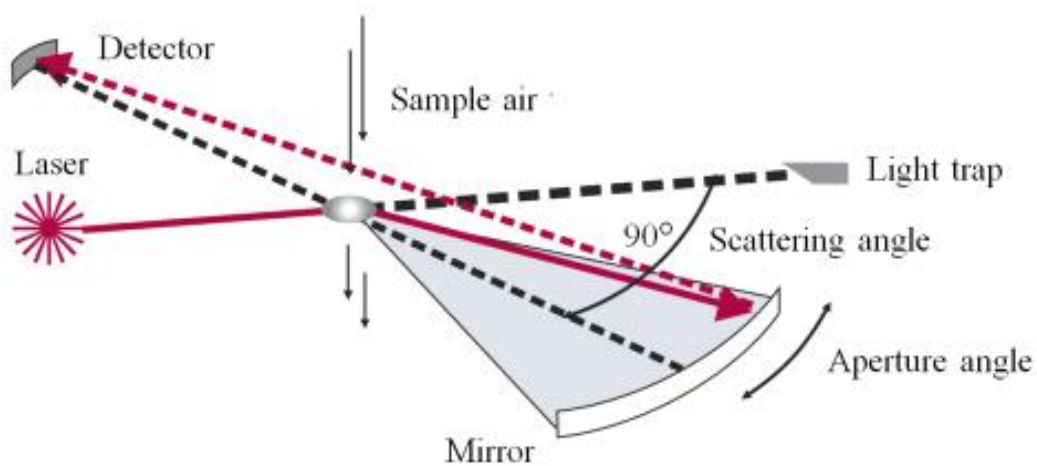


Fig. 3.2 Principle of light scattering method

3.3 가우시안 분포 및 확산 모델

대기오염물질이 배출원에서 배출 후 대기 중에서의 확산은 매우 복잡하기 때문에 오염물질의 확산을 수학적으로 표현하기 어려우며, 수학적으로 표현할 수 있더라도 해를 구하는 것이 매우 어렵거나 해를 구하지 못하는 경우도 있다.

이러한 경우 여러 가지 가정을 오염물질의 확산 과정에 추가하여 확산과정을 단순화시킴으로써 비교적 간단히 해를 구할 수 있다. 그리고 가우시안 모델은 대기확산과정을 단순화시킨 대표적인 모델로서 배출원에서 배출되는 오염물질이 가우시안 분포, 즉 정규 분포를 가지고 풍하 방향으로 확산되어 간다는 가정을 기본적으로 사용한다.

가우시안 분포는 종모양의 곡선이며, 이를 함수로 표현하면 식 (3.1)과 같다.

$$f(x) = \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad (3.1)$$

여기서, μ 는 분포의 평균, 즉 $f(x)$ 의 최대값에 해당하는 x 값이며, σ 는 표준편차로 가우시안 분포 곡선의 퍼짐 정도를 결정하는 인자이다. 즉 μ 와 σ 가 가우시안 분포 함수의 일반적인 위치 및 모양을 결정하며, μ 와 σ 값들의 변화에 따라 무수히 많은 가우시안 분포 함수가 존재할 수 있다 (Fig 3.3).

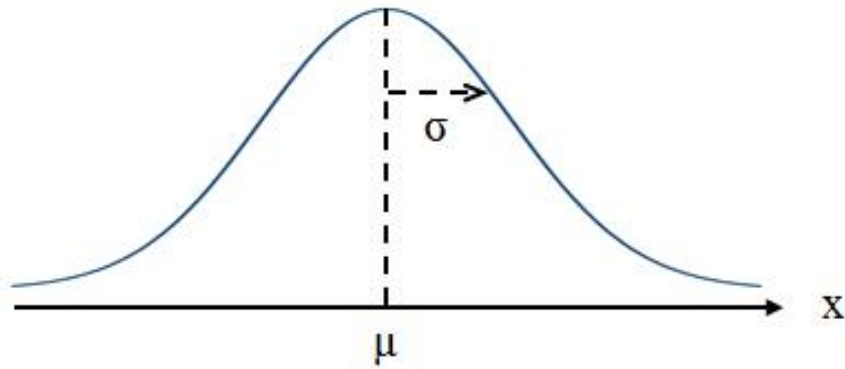


Fig. 3.3 Example for gaussian standard distribution

일반적으로 가우시안 모델에서 이러한 확산 방정식은 이중의 가우시안 분포형식을 가지고 있다 (Fig. 3.4). 즉, 바람이 부는 방향을 x 방향, x 방향에 대하여 수평으로 직교하는 방향을 y 방향, 그리고 x 방향에 대하여 수직인 방향을 z 방향이라 할 때, 두 개의 좌표 방향, y 및 z 방향에서의 이중 가우시안 분포는 각 좌표 방향에서의 단일 가우스 분포의 합으로써 표현된다 (김성중, 2001).

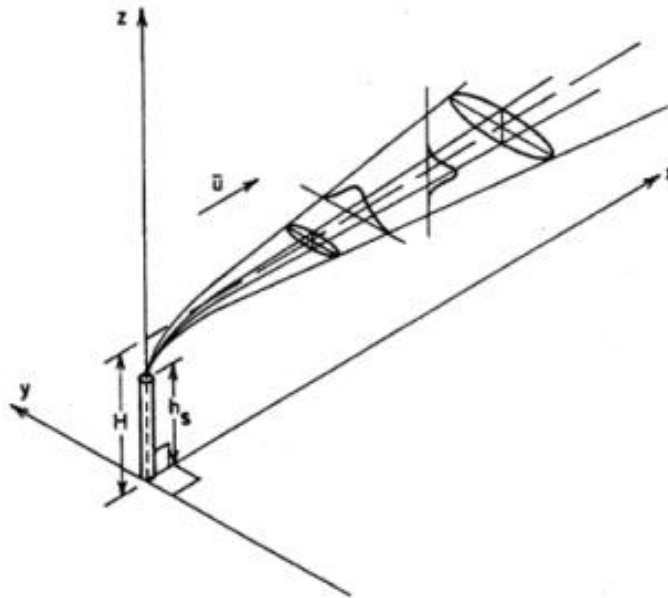


Fig. 3.4 The coordinate system of gaussian model and distribution of pollutant diffusion

제 4 장 재료 및 방법

4.1 실험 재료

본 연구에 사용된 재료는 흙에서 발생하는 비산먼지가 가장 많은 지역 중 하나인 운동장을 모사하기 위해 서울시 성북구 안암동 지역에서 채취한 풍화토를 사용하였다. 운동장 조성 기준인 국토해양부 승인 조경 설계기준 (한국조경학회, 2013) 에 따라 4.75mm체 통과 시료를 사용하였다. 재료의 물리적 특성은 Table 4.1 과 같다. 통일분류법으로 분류한 결과 본 풍화토는 SW-SM으로 분류되었으며, 입도 분포 곡선은 Fig. 4.1 과 같다.

Table 4.1 Physical properties of soil

G_s	Passing sieve 0.075 mm (%)	D_{10} (mm)	D_{30} (mm)	D_{60} (mm)	C_u	C_g	USCS
2.64	10.10	0.075	0.44	1.60	21.28	1.62	SW-SM

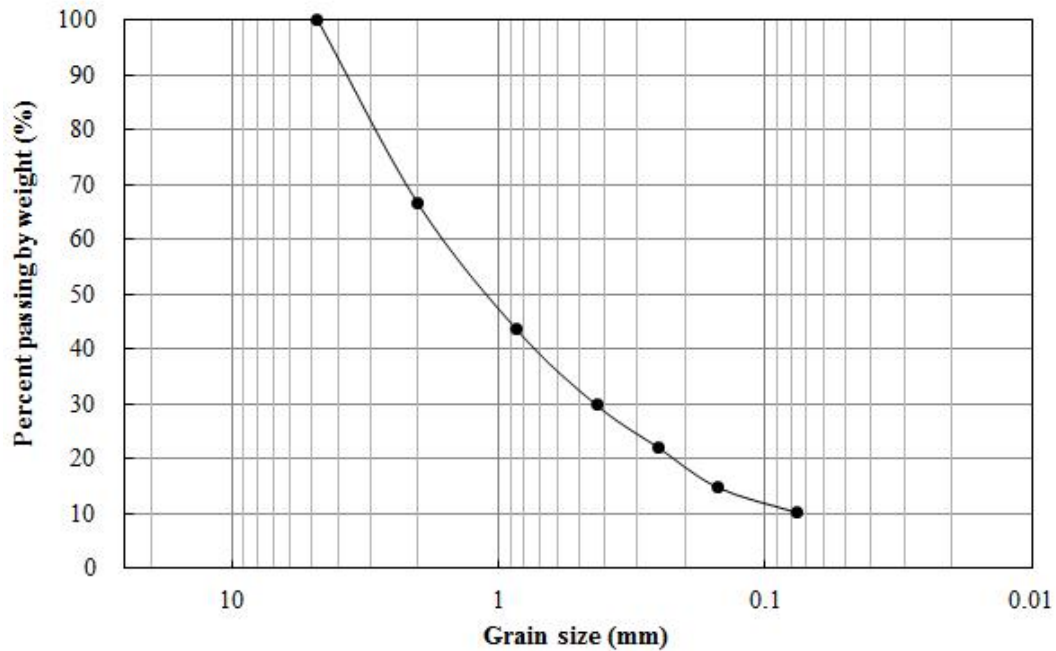


Fig. 4.1 The particle size distribution curve of soil

4.2 실험 장비

비산먼지 발생량 측정에는 GRIMM사의 Portable aerosol spectrometer (Model 1.109) 를 사용하였다 (Fig. 4.2). 이 장비는 0.25~32 μ m 입경의 먼지 농도 및 개수를 31가지의 채널을 통해 측정 할 수 있으며, PM₁₀, PM_{2.5} 등 환경 기준에 따른 먼지 발생량 측정도 가능하다.

운동장 현장 조건을 실내에서 재현하기 위해 100×100cm 규격의 나무 판을 제작하여 함수비 0%인 노건조 상태의 풍화토를 4cm 두께로 포설 하였다 (Fig. 4.3). 포설된 풍화토의 밀도는 1.44 t/m³ 이다.



Fig. 4.2 Portable aerosol spectrometer



Fig. 4.3 Wooden board and paved soil

낙하 추 크기를 변화시키기 위해 해당 크기의 나무 판을 제작, 추에 고정시켜 낙하시키는 방법을 선택하였다 (Fig 4.4, 4.5). 또한 낙하 높이 유지를 위해 철제 프레임으로 바퀴가 달린 도르래를 제작, 낙하 나무 판과 일정 무게의 추를 도르래에 고정시킨 후 도르래를 이동시키면서 추

낙하를 실시하였다 (Fig. 4.6).



Fig. 4.4 Weight

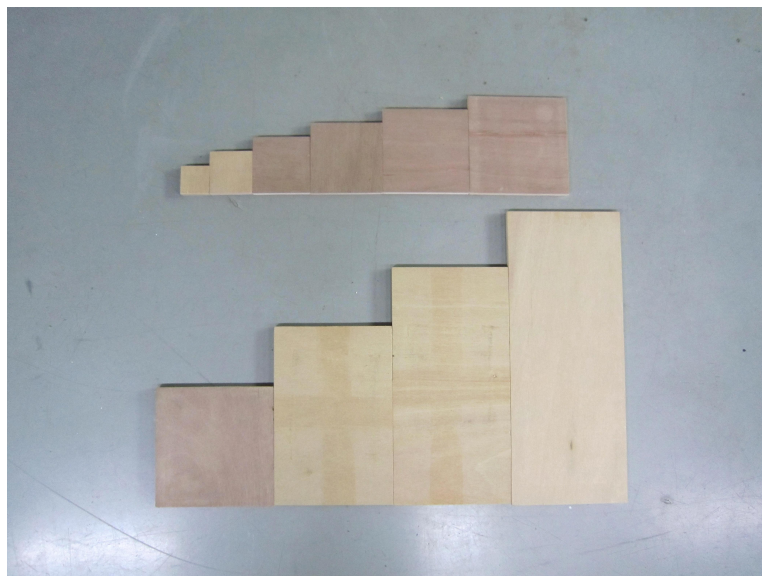


Fig. 4.5 Wooden plate for weight fixed



Fig. 4.6 Pulley for drop test

풍속을 변화시키기 위해 이동식 소형 풍동을 이용하여 풍속을 가하는 방법을 선택하였다. 풍동의 기본 구조는 풍속을 생성할 수 있는 대형 팬과 외부 풍속에 대한 영향을 최소화하기 위한 풍동 벽면으로 이루어져 있다. 풍동의 벽면의 재질은 두께 5mm의 아크릴로 제작하였으며 프레임은 알루미늄을 사용하였다. 구동 팬의 경우 정격출력 2마력의 모터와 함께 직경 50인치 팬을 사용하였다. Fig. 4.7 은 풍동의 구조이다.

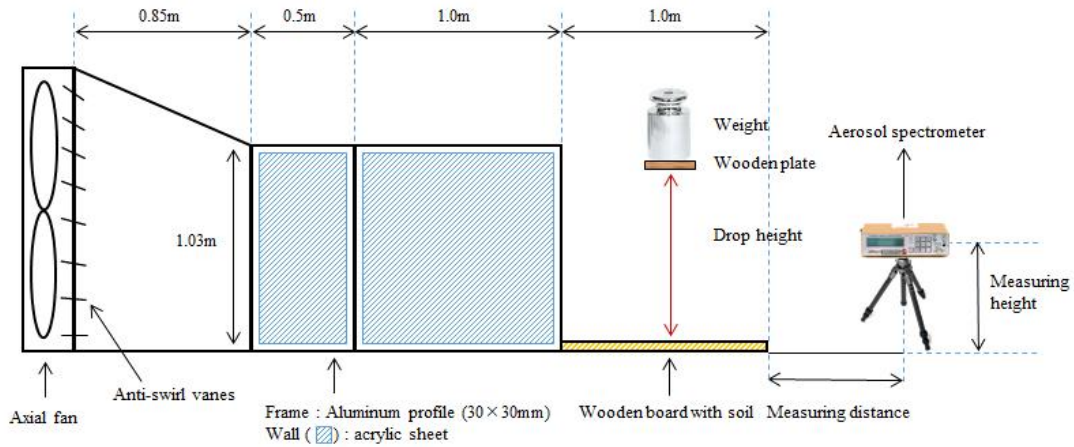


Fig. 4.7 Schematic view of the portable wind tunnel

4.3 실험 방법

바람 등 외부 조건에 의한 비산먼지 발생 영향을 최소화하기 위해 실내에서 실험을 진행하였다. 외부 충격을 가하는 방법으로는 낙하 충격을 선택하였으며, 풍화토를 포설한 나무 판에 추를 일정한 주기로 낙하시키는 방법을 사용하여 낙하 충격을 가하였다.

추 낙하시 시료의 다짐으로 인한 영향을 감소시키기 위해 추를 이동시키면서 낙하하였다. 포설된 풍화토가 아닌 나무 판에 추가 낙하하여 운동에너지가 전달되지 않는 경우를 방지하기 위해 낙하 위치는 나무 판 좌측 끝 지점에서 20~80cm 지점을 9등분한 지점들을 선정하였다. 이 지점들을 따라 추를 직선으로 왕복 이동시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 추의 낙하 주기는 10초에 1회이며 비산먼지 측정 시간은 3분으로, 연속적인 인간의 활동으로 인한 비산먼지 발생 및 추의 왕복 이동 낙하를 고려하여 추의 낙하 주기와 측정 시간을 결정하였다. 시험의 모식도는 Fig. 4.8 과 같다.

비산먼지 발생량은 미세먼지 예보 기준인 $10\mu\text{m}$ 보다 입경이 작은 미세먼지의 농도 PM_{10} 을 기준으로 측정하였으며, 주의 반복 낙하에 의해 먼지 발생량이 중첩되어 측정됨에 따라 3분 동안 측정한 먼지 발생량의 최대값을 사용하였다. 실제 시험은 Fig. 4.9 와 같이 진행되었다.

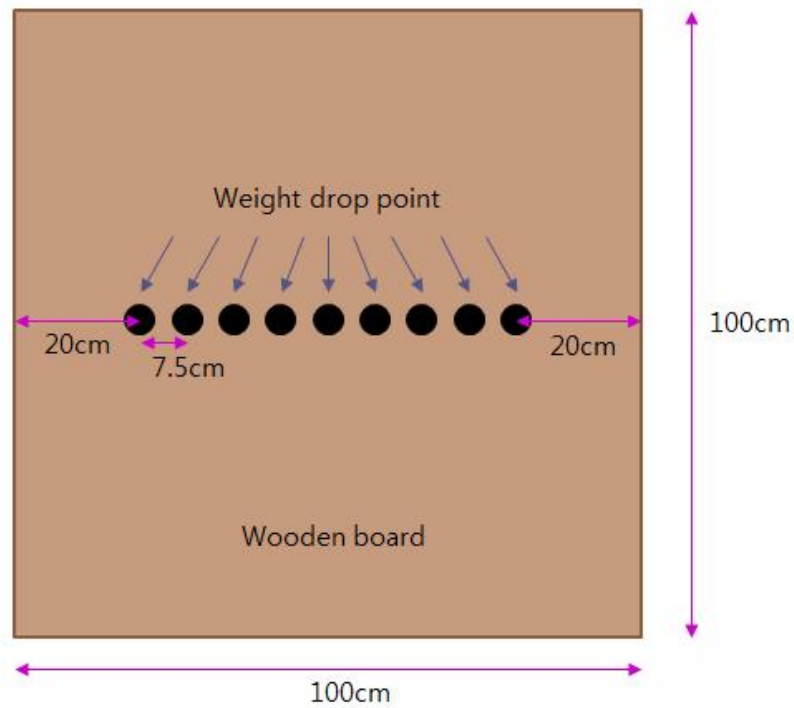


Fig. 4.8 Schematic diagram of soil dust emission test



Fig. 4.9 Portable wind tunnel and wooden board for dust dispersion test

4.3.1. 낙하 추의 운동에너지 및 크기에 따른 비산먼지 발생

비산 먼지 발생량에 영향을 미치는 여러 물리적 조건을 고려하기 위해 낙하 추의 높이, 낙하 추의 무게, 낙하 추의 크기를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 비산먼지 측정기의 위치는 바닥에서 0.25m 지점, 나무 판의 중심에서 0.50m 떨어진 지점에서 측정하였다.

추의 낙하 높이와 비산먼지 발생량의 상관관계를 파악하기 위하여 0.25, 0.50, 0.75, 1.0m 높이에서 추를 낙하시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 이 때 3.0, 5.0, 7.0kg의 추를 사용하였으며 낙하 추의 크기는 15×15cm로 고정하여 12 case의 실험을 수행하였다.

낙하 추의 무게 변화에 따른 비산먼지 발생량에 대한 영향을 파악하기 위하여 1.0, 3.0, 5.0, 7.0, 9.0, 11.0kg 무게의 추를 적용하였다. 이 때, 낙하 높이는 1m, 낙하 추 크기는 15×15cm로 고정하여 6 case의 실험을 수행하였다.

낙하 추의 크기변화에 따른 비산먼지 발생량을 파악하기 위해 3.0,

5.0, 7.0kg의 추를 이용하였으며, 5×5cm, 7.5×7.5cm, 10×10cm, 12.5×12.5cm, 15×15cm, 17.5×17.5cm, 20×20cm, 20×30cm, 20×40cm, 20×50cm 크기의 낙하 판을 통해 크기 변화에 따른 비산먼지 발생량의 영향을 파악하여 30 case의 시험을 수행하였다. 각각의 case들은 Table 4.2 에 정리하였다.

Table 4.2 Cases of soil dust emission test

Cases	Drop height (m)	Drop weight (kg)	Drop weight size (cm)
Effect on drop height	0.25, 0.50 0.75, 1.0	3.0, 5.0, 7.0	15×15
Effect on drop weight	1.0	1.0, 3.0 5.0, 7.0 9.0, 11.0	15×15
Effect on drop size	1.0	3.0, 5.0, 7.0	5×5, 7.5×7.5 10×10, 12.5×12.5 15×15, 17.5×17.5 20×20, 20×30 20×40, 20×50

4.3.2. 풍속 및 낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산

풍속 변화에 따른 비산먼지 확산 특성을 분석하기 위해 이동식 소형 풍동을 이용하여 풍속과 측정 높이, 측정 거리를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 낙하 추 무게는 5.0kg, 풍속은 0.0, 1.0, 2.9m/s를 적용하였다. 비산먼지 발생 위치에서의 풍속을 측정하기 위해 포설된 풍화토와

같은 높이인 5cm 높이에서 풍속을 측정하였다. 측정 높이는 0.25, 0.50, 0.75, 1.0m이며 측정 거리는 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0m이다. 풍속 변화에 따른 비산먼지 확산 특성은 총 72 case의 시험을 수행하였다.

낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지의 확산 특성을 분석하기 위해 낙하 추의 무게와 측정 높이, 측정 거리를 변화시키면서 실험을 수행하였다. 낙하 추의 무게는 3.0, 5.0, 7.0kg의 추를 이용하였으며 면적은 15×15cm로 고정시켰다. 측정 높이는 0.25, 0.50, 0.75, 1.0m이며 측정 거리는 0.5, 1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0m이며, 총 72 case의 시험을 수행하였다. 각각의 case들은 Table 4.3 에 정리하였다.

Table 4.3 Cases of soil dust dispersion test

Cases	Wind speed (m/s)	Drop weight (kg)	Measuring height (m)	Measuring distance (m)
Effect on wind speed	0.0 1.0 2.9	5.0	0.25, 0.50, 0.75, 1.0	0.5, 1.0 2.0, 3.0 4.0, 5.0
Effect on drop weight	0.0	3.0 5.0 7.0	0.25, 0.5, 0.75, 1.0	0.5, 1.0 2.0, 3.0 4.0, 5.0

제 5 장 결과 및 고찰

5.1. 낙하 추의 운동에너지 및 크기에 따른 비산먼지 발생 특성

낙하 충격에 의한 비산먼지 발생에 영향을 주는 물리적인 요인인 낙하 높이, 무게 및 낙하 추의 크기 변화에 따른 비산먼지 발생량을 측정하였으며, 이에 따른 먼지 발생 특성에 대해 분석하였다.

5.1.1. 낙하 높이에 따른 영향

낙하 높이 변화에 따른 PM_{10} 발생량 측정 결과는 Fig. 5.1 과 같다.

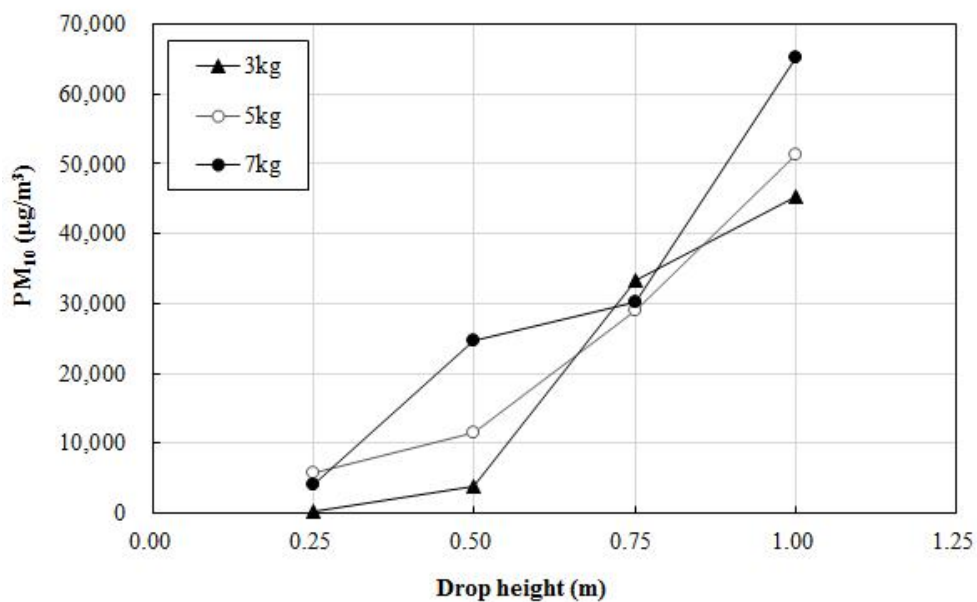


Fig. 5.1 Relationship between PM_{10} and drop height

3.0, 5.0, 7.0kg의 경우 모두 낙하 높이가 증가함에 따라 PM₁₀ 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 같은 높이에서의 경우 무게가 증가할수록 비산먼지 발생량도 증가 하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

낙하하는 추에 의해 발생하는 운동에너지가 풍화토 표면에 충격을 가하면 포설되어 있던 풍화토 표면 입자에 운동 에너지가 전달되어 대기 중으로 비산하게 된다. 낙하 무게 및 낙하 높이가 증가하게 되면 운동 에너지가 증가하게 되며, 이에 따라 풍화토 입자에 전달되는 에너지가 증가하면서 비산먼지 발생량이 증가한 것으로 판단된다.

5.1.2. 낙하 추 무게에 따른 영향

낙하 무게 변화에 따른 비산먼지 발생량 측정 결과는 Fig. 5.2 에 나타내었다.

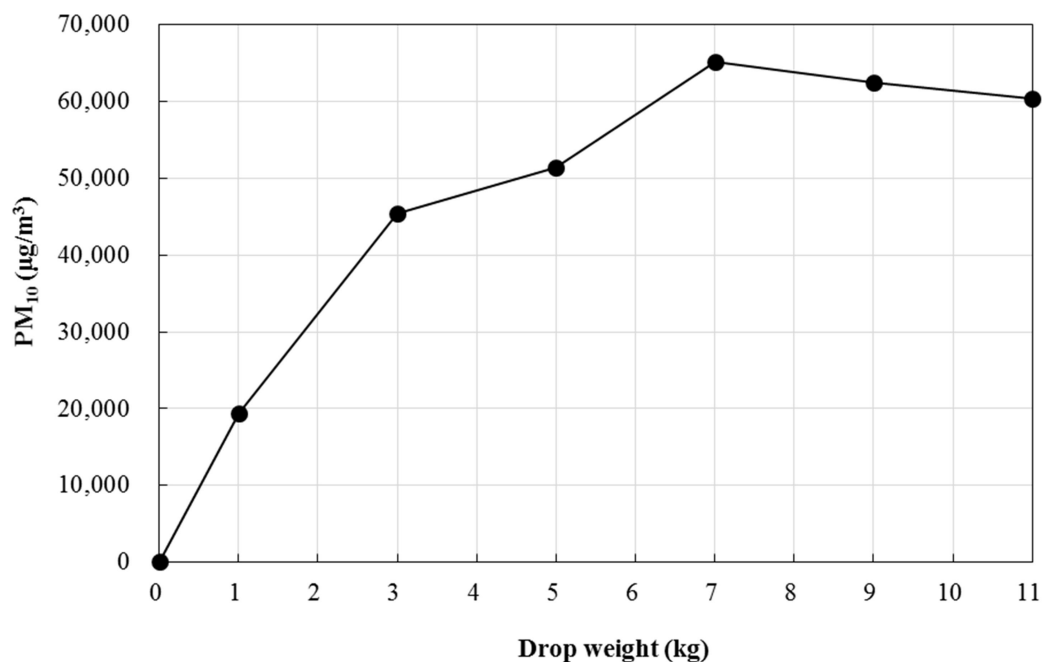


Fig. 5.2 Relationship between PM₁₀ and drop weight

추 무게 7.0kg까지는 운동에너지가 증가하여 PM₁₀ 발생량도 증가하는 것으로 나타났으나, 7.0kg 이후에는 추의 무게가 증가함에도 불구하고 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다.

낙하 추 무게의 증가에 따라 일정 무게까지는 운동에너지의 증가에 따라 비산먼지가 증가하는 경향이 보이지만 운동에너지에 따른 비산먼지 발생의 한계치가 존재하는 것으로 나타났다.

5.1.3. 낙하 추 크기에 따른 영향

낙하 추의 크기는 낙하 추의 면적 및 둘레를 통해 표현할 수 있다. 면적과 둘레 중 비산먼지 발생 특성 파악에 적합한 요인을 파악하기 위해 낙하 추의 면적 및 둘레에 따른 영향을 분석하였다.

낙하 면적 및 둘레에 따른 비산먼지 발생량 측정 결과는 Fig. 5.3, 5.4와 같다.

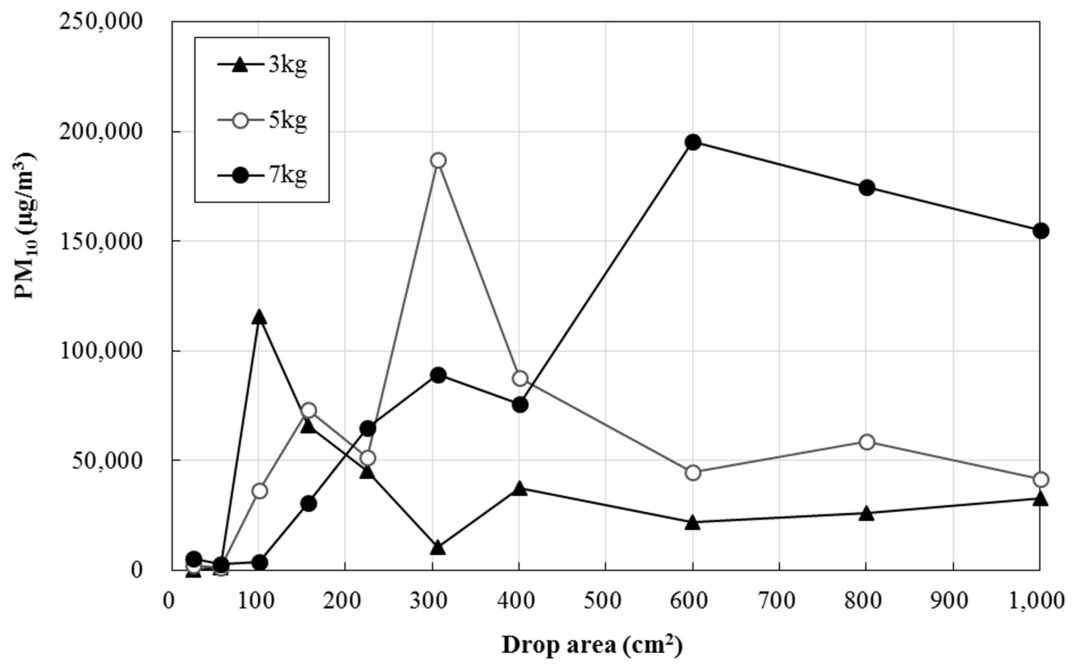


Fig. 5.3 Relationship between PM₁₀ and drop area

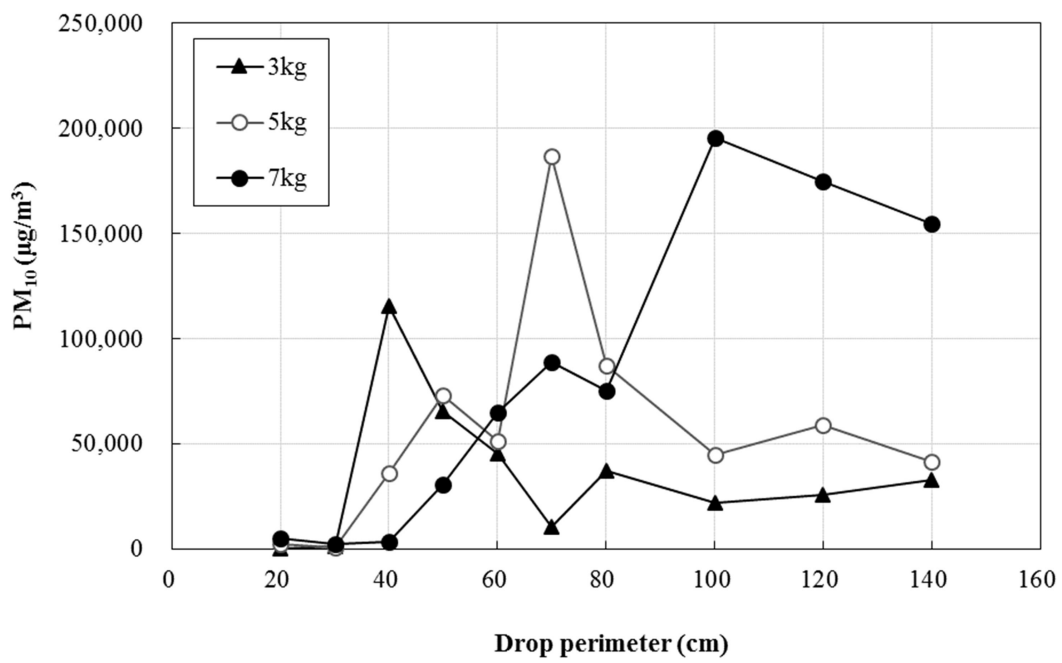


Fig. 5.4 Relationship between PM₁₀ and drop perimeter

7.0kg 추의 경우, 낙하 추의 면적이 증가하면서 비산먼지 발생량도 증가하는 경향을 보였으나 낙하 추의 면적이 600cm^2 이상으로 증가할 경우, 낙하 추 면적 증가에도 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다. 이러한 경향은 3.0kg, 5.0kg에서도 관찰할 수 있었다. 3.0kg의 경우 100cm^2 에서 비산먼지 발생량이 최대가 되며, 5.0kg의 경우 306.25cm^2 에서 비산먼지 발생량이 최대가 되는 것으로 나타났다. 그 이후에는 낙하 추의 면적 증가에 따라 비산먼지 발생량은 감소하는 경향을 보이는 것으로 나타났다.

낙하 추의 둘레도 마찬가지로 낙하 추 무게가 3.0kg일 경우 낙하 추 둘레가 40cm 에서, 5.0kg일 경우 둘레가 70cm 에서, 7.0kg일 경우 100cm 에서 비산먼지 발생량이 최대가 되는 것으로 나타났으며, 그 이후에는 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 감소하는 경향을 보였다.

이로 미루어 볼 때, 각 무게 별로 낙하 추 면적 및 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 증가하는 양상을 보이는 한계면적, 한계둘레가 존재하는 것으로 나타났다. 비산먼지의 발생량은 낙하 추의 무게, 낙하 높이 등 운동에너지뿐만 아니라 낙하 추의 크기의 영향을 받는 것으로 나타났다.

5.1.4. 운동에너지 및 낙하 둘레에 따른 먼지 발생량 추정

추의 낙하 높이와 낙하 추의 무게는 운동에너지를 통해 한 개의 변수로 표현될 수 있다. 낙하 추의 높이 및 낙하 추의 무게의 변화에 따른 영향에 대한 중복 분석을 방지하기 위해 낙하 높이 및 낙하 추의 무게에 대한 영향을 운동에너지 한 개의 변수를 통해 분석하였다.

추 낙하 시 비산먼지의 발생량은 운동에너지와 낙하 면적 및 둘레에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 낙하 추의 면적 및 둘레가 한계 면적 및 둘레 이상일 경우와 이하일 경우의 비산먼지 발생 특성이 다를 것으로 판단된다. 이에 따라 운동에너지와 낙하 면적, 둘레의 비율에 따른 비

산먼지 발생량 분석을 통해 운동에너지 및 낙하 추의 면적, 둘레에 대한 관계를 파악하였다.

낙하 추의 면적 및 둘레에 대한 운동에너지의 비율 ($\frac{\text{운동에너지}}{\text{면적}}$, $\frac{\text{운동에너지}}{\text{둘레}}$)과 비산먼지 발생량과의 그래프는 Fig. 5.5, 5.6 과 같다.

낙하 추의 면적에 대한 운동에너지의 비율의 경우, 3.0kg의 경우 운동에너지와 낙하 추 면적 비율이 $0.2940 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}^2$ 까지 낙하 추의 면적에 대한 운동에너지의 비율이 증가함에 따라 비산먼지 발생량도 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 5.0kg의 경우 $0.1600 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}^2$ 까지, 7.0kg의 경우 $0.1143 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}^2$ 까지 비산먼지 발생량이 증가하는 것으로 나타났다.

낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율의 경우, 3.0kg의 경우 운동에너지와 낙하 추 둘레 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 까지 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 증가함에 따라 비산먼지 발생량도 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났으며, 5.0kg의 경우 $0.700 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 까지, 7.0kg의 경우 $0.686 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 까지 비산먼지 발생량이 증가하는 것으로 나타났다.

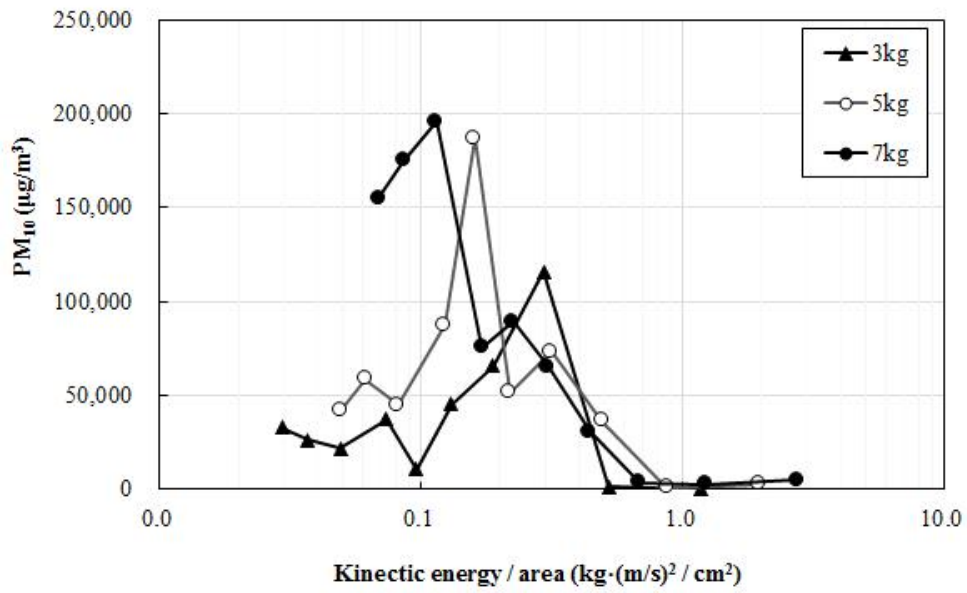


Fig. 5.5 Relationship between PM₁₀ and kinetic energy per area

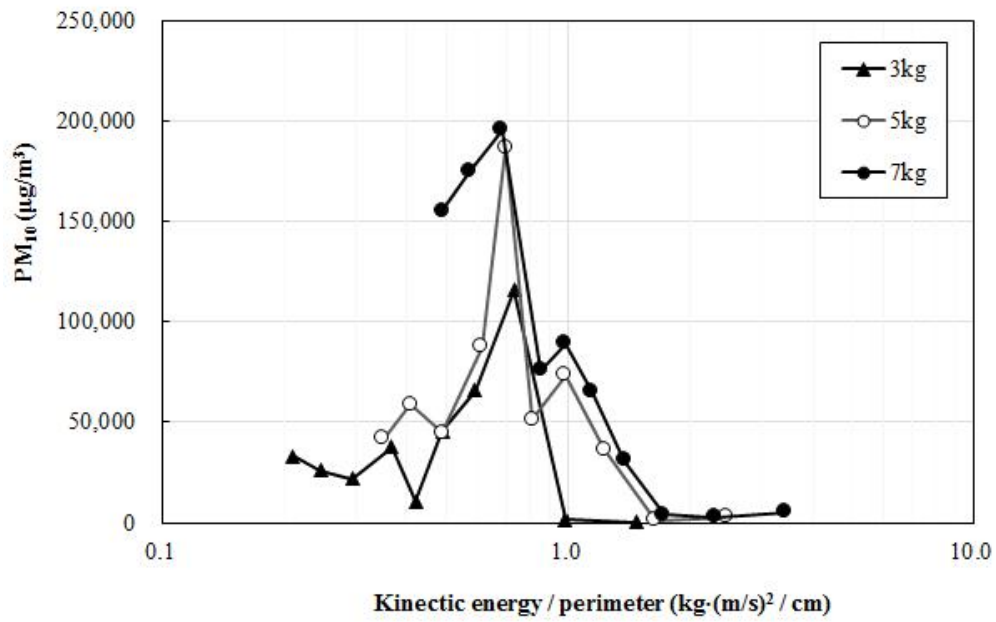


Fig. 5.6 Relationship between PM₁₀ and kinetic energy per perimeter

낙하 추의 면적에 대한 운동에너지의 비율의 경우 낙하 추의 면적 증가에 따른 낙하 추의 면적에 대한 운동에너지의 비율이 낙하 추 무게에 따라 다른 값을 나타냈으나 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율의 경우 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 $0.7 \text{ kg}\cdot(\text{m/s})^2/\text{cm}$ 정도로 비슷한 값을 나타냈다.

낙하 추의 면적 및 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 일정한 값 초과인 경우와 이하인 경우 비산먼지 발생 양상이 다르게 나타나게 되는데, 낙하 추의 면적에 대한 운동에너지의 비율과 달리 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율 값은 $0.7 \text{ kg}\cdot(\text{m/s})^2/\text{cm}$ 정도로 일정한 경향을 보이는 것으로 나타나 비산먼지 발생 특성이 달라지는 기준을 명확히 제시할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 추가 흡 표면에 낙하할 경우 실제 비산먼지는 추의 낙하 둘레를 따라 발생하게 되므로 낙하 추의 면적보다는 추의 둘레가 낙하 충격 발생 시 비산먼지 발생 특성 분석에 더 적합한 요인으로 판단된다.

이에 따라 운동에너지와 낙하 추의 둘레간의 비산먼지 발생량 추정 회귀식을 작성하기 위해 3.0kg에서 비산먼지 발생 특성이 변화하는 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율인 $0.735 \text{ kg}\cdot(\text{m/s})^2/\text{cm}$ 를 기준으로 기준 초과, 기준 이하로 구분하여 작성하였으며, 일반식은 식 (5.1) 과 같다.

$$PM_{10} = a \times E^b \times e^{(c \times P)} \quad (5.1)$$

여기서, PM_{10} : 추정된 PM_{10} 값 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

E : 낙하 추의 운동에너지 ($\text{kg}\cdot(\text{m/s})^2$)

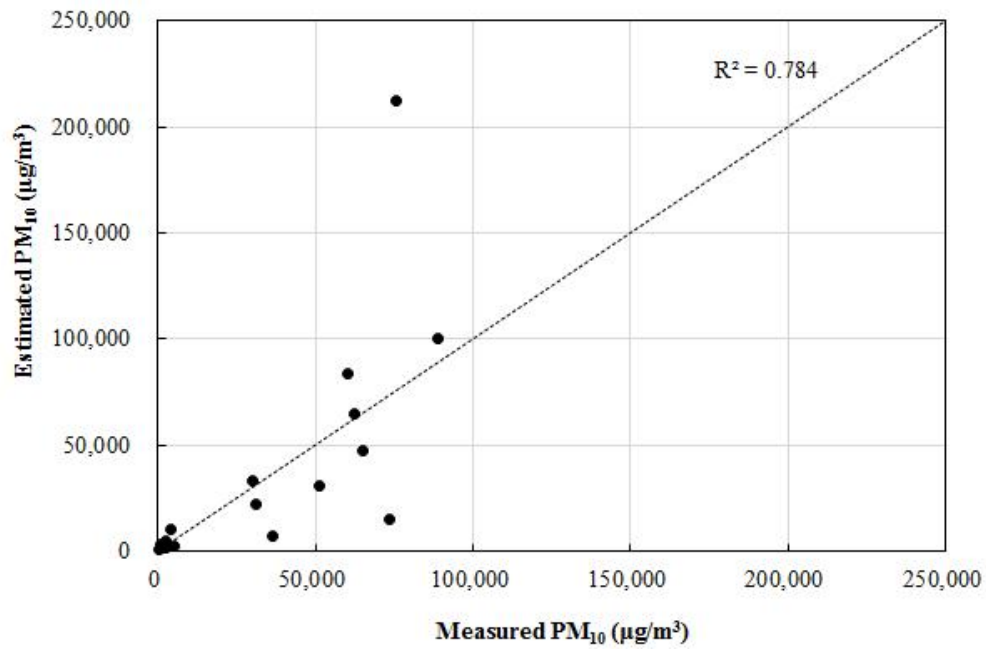
P : 낙하 추의 둘레 (cm)

이 식에서 상수 a, b, c값과 R^2 , RMSE값은 Table 5.1 과 같다.

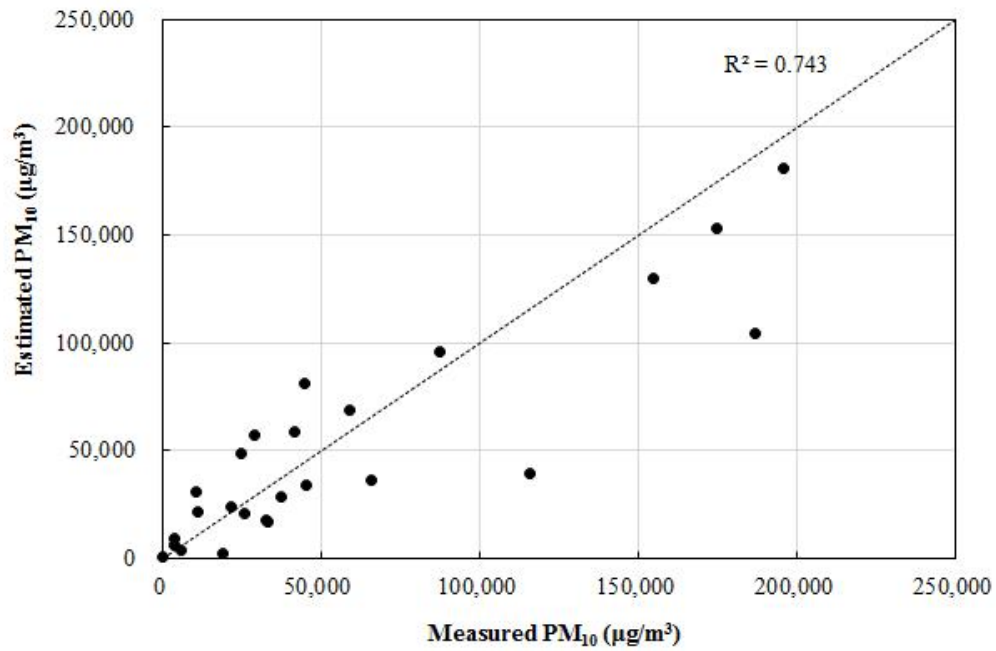
Table 5.1 Coefficient a, b, c and R^2 , RMSE of equation for kinetic energy and perimeter

Cases	a	b	c	R^2	RMSE
Excess kinetic energy per perimeter $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$	2.5082	1.2629	0.0751	0.784	38071.13
Below kinetic energy per perimeter $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$	18.5117	2.3667	-0.0082	0.743	27919.02

회귀식 작성 결과 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 초과일 경우 회귀식의 R^2 값이 0.784, 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 이하일 경우 회귀식의 R^2 값이 0.743으로 나타나 상대적으로 높은 R^2 값을 보였다. 회귀식으로 추정된 PM_{10} 값과 측정된 PM_{10} 값의 상관관계 그래프는 Fig. 5.7 과 같다.



(a) Excess the perimeter ratio of energy $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$



(b) Below the perimeter ratio of energy $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$

Fig. 5.7 Relationship between the measured and estimated PM_{10} about kinetic energy and perimeter

낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 초과일 경우 R^2 값이 상대적으로 큰 편이나 측정값과 추정값 간의 오차가 있는 것으로 나타났다. 낙하 추의 둘레에 대한 운동에너지의 비율이 $0.735 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2 / \text{cm}$ 이하일 경우 추정값과 측정값이 상대적으로 작은 오차를 나타내며, 이를 통해 먼지 발생량을 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

5.2. 풍속 및 낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산 특성

외부 충격에 의해 발생한 비산먼지의 풍속 변화에 따른 확산 특성을 파악하기 위해 풍속 변화에 따라 측정 높이, 위치를 변화시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다. 또한 낙하 추의 에너지 변화에 따른 비산먼지 확산 특성을 분석하기 위해 낙하 추 무게 및 측정 높이, 위치를 변화시키면서 비산먼지 발생량을 측정하였다.

5.2.1. 풍속 변화에 따른 높이, 거리별 비산먼지 확산 특성

낙하 충격에 의해 발생한 비산먼지의 확산 특성을 파악하기 위해 풍속을 0.0m/s , 1.0m/s , 2.9m/s 로 변화시키면서 측정 거리, 높이에 따른 비산먼지 발생량을 측정하였다. 낙하 무게는 5.0kg 이다.

Fig. 5.8 은 풍속 변화 및 측정 높이에 따른 비산먼지 측정값 변화를 나타낸 그래프이다. 측정 거리는 나무관 중심거리에서 0.5m 떨어진 지점이며, 측정 높이는 0.25 , 0.50 , 0.75 , 1.0m 이다. 또한 Fig. 5.9 는 풍속 변화 및 측정 거리에 따른 PM_{10} 측정값 변화를 나타낸 그래프이다. 측정 높이는 1.0m 이다.

풍속이 증가할수록 상대적으로 빠른 확산속도로 인해 높이에 따른 PM_{10} 측정값이 감소하는 것으로 나타났다. 측정 높이가 증가할수록 PM_{10} 측정값이 감소하는 추세를 나타냈으며, 풍속이 감소할수록 감소폭이 증가하는 것으로 나타났다. 풍속이 존재할 경우, 측정거리에 따른 영향은 풍속이 존재하지 않을 때 보다 작은 것으로 나타났다.

풍속이 0.0m/s일 경우, PM_{10} 측정값은 거리가 증가함에 따라 감소하는 경향을 보였다. 풍속이 1.0m/s, 2.9m/s일 경우에는 측정 거리에 비산먼지 측정량이 크게 변하지 않는 것으로 나타났다.

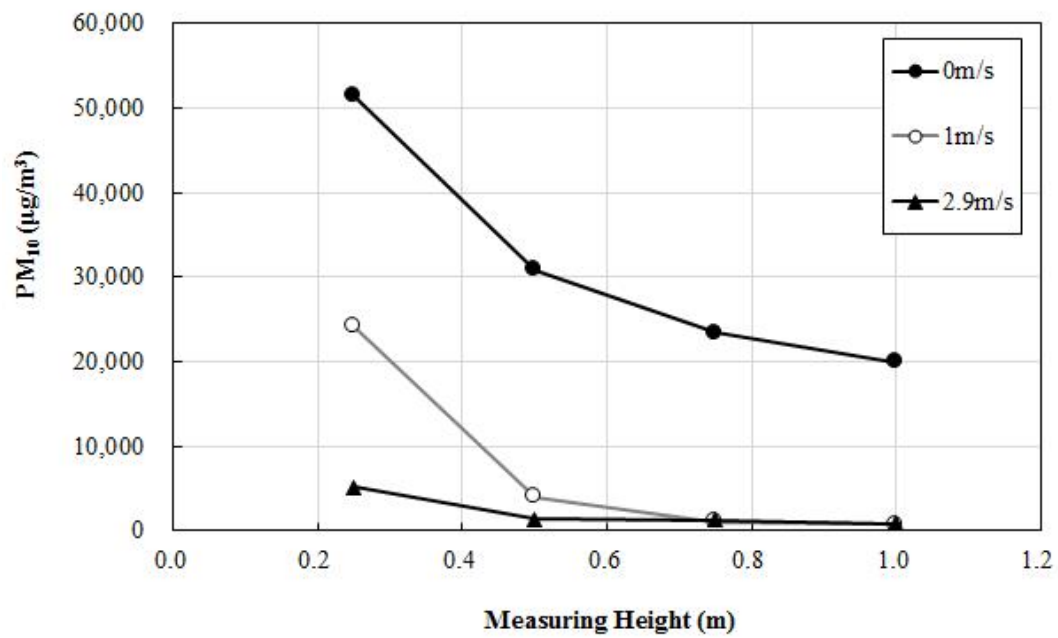


Fig. 5.8 Relationship between PM₁₀ and wind speed, measuring height

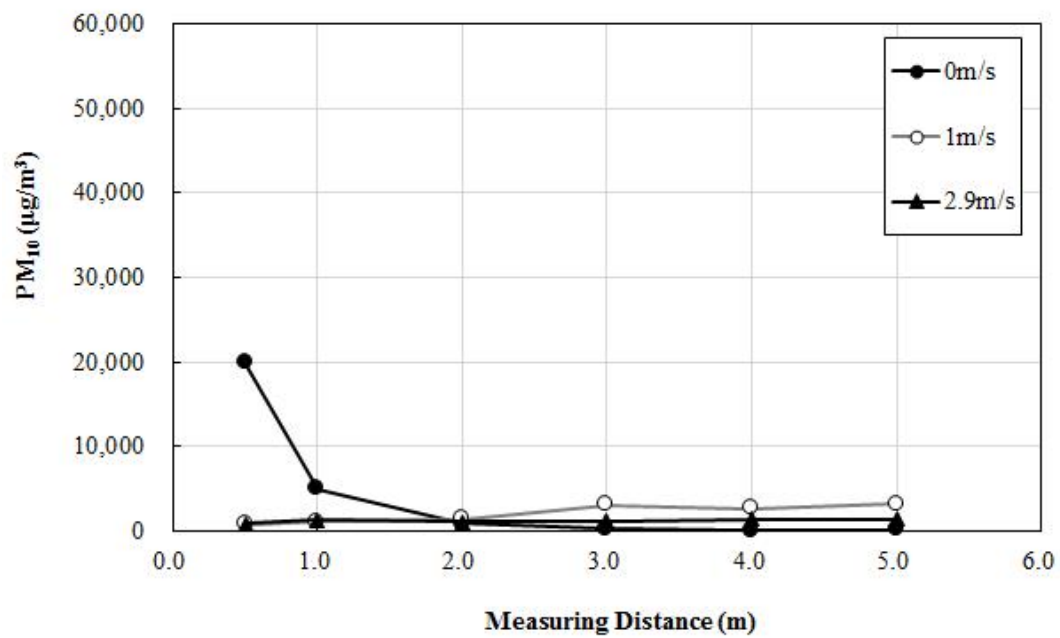


Fig. 5.9 Relationship between PM₁₀ and wind speed, measuring distance

Fig 5.10은 풍속이 0.0m./s일 때 측정 높이와 측정 거리에 따른 PM₁₀ 측정값에 대한 그래프이다.

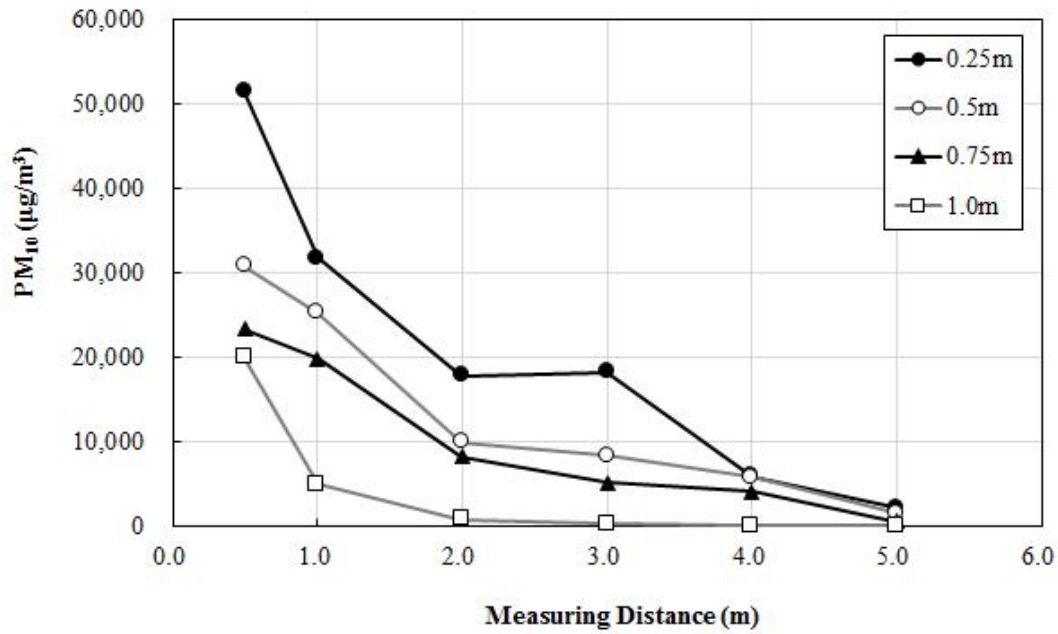


Fig. 5.10 Relationship between PM₁₀ and measuring height, distance at 0.0m/s

풍속이 0.0m/s일 경우, PM₁₀ 측정값은 거리에 측정 높이와 거리가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났다. 풍속이 존재하지 않을 경우에는 비산먼지 확산 특성은 측정 거리와 높이에 영향을 받는 것으로 나타났다. 측정 높이가 낮을수록 PM₁₀의 감소폭이 증가하는 것으로 나타났다. 풍속이 존재하지 않을 때 발생한 비산먼지는 높이, 거리에 따라 이중 가우시안 모델에 의해 확산하는 것으로 판단된다.

Fig 5.11은 풍속이 1.0m/s일 때 측정 높이와 측정 거리에 따른 PM₁₀ 측정값에 대한 그래프이며, Fig 5.12는 풍속이 2.9m/s일 때 측정 높이와 측정 거리에 따른 PM₁₀ 측정값에 대한 그래프이다.

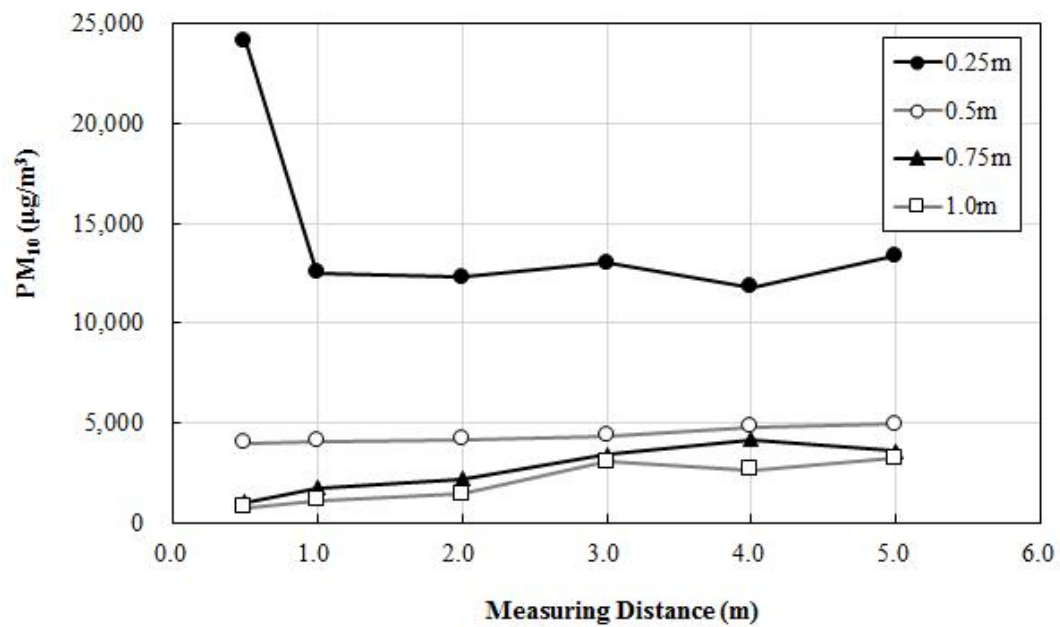


Fig. 5.11 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 1.0m/s

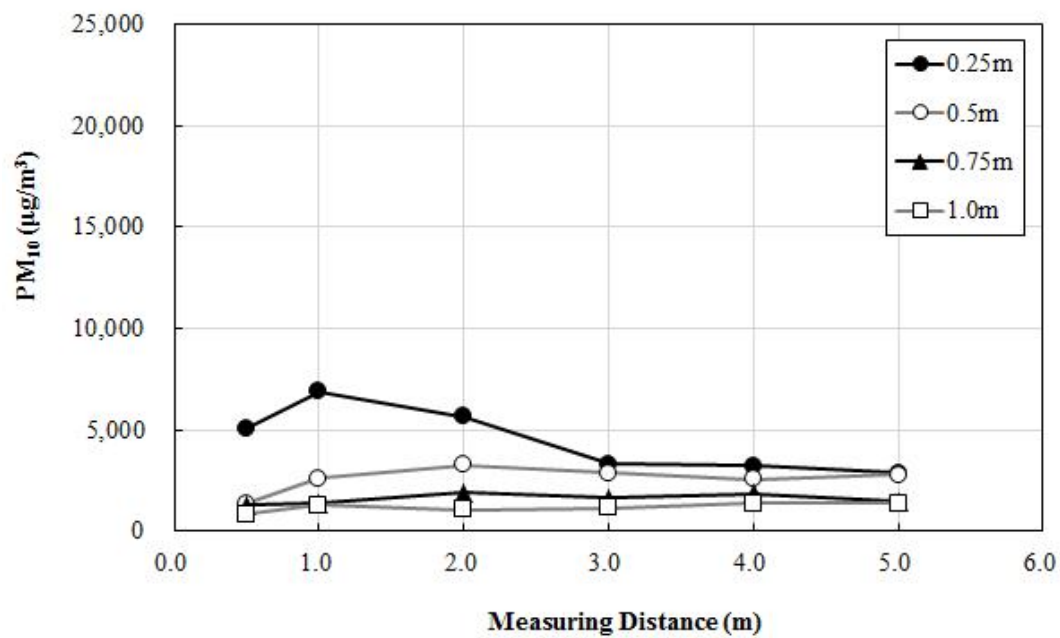


Fig. 5.12 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 2.9m/s

풍속이 1.0m/s일 경우, 측정높이가 0.25m일 때의 측정값이 다른 높이에 비해 상대적으로 큰 경향을 나타냈다. 이는 대부분의 비산먼지가 상대적으로 0.25m 보다 낮은 높이로 확산이 되기 때문으로 판단된다. 측정 거리에 따라서는 비산먼지 측정량이 큰 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다으며, 측정 높이에 대한 영향이 상대적으로 측정 거리에 대한 영향보다 큰 것으로 나타났다.

풍속이 2.9m/s일 경우에는 풍속이 1.0m/s일 경우보다 상대적으로 측정 높이에 따른 PM_{10} 측정값 차이가 작은 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 풍속으로 인해 낙하 충격으로 발생한 비산먼지의 확산 범위가 증가하여 상대적으로 고른 범위에서 확산이 이루어진 것으로 판단되며, 거리에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

풍속이 존재할 경우, 비산먼지 확산 특성은 비선형성이 강하게 존재하여 비산먼지 추정이 불가능한 것으로 판단된다. 하지만 풍속이 존재하지 않을 경우 높이 및 거리에 따라 가우시안 모델에 의해 확산하는 것으로 판단됨에 따라 높이, 거리에 따른 이중 가우시안 확산 모델에 따른 비산먼지량 추정을 위한 회귀식을 작성 가능할 것이라 판단된다. 이중 확산에 따른 높이, 거리의 연성향을 고려하기 위해 최소자승법을 이용하여 회귀식을 작성하였으며, 일반식은 식 (5.2) 와 같다.

$$PM_{10} = a + b \times H + c \times D + d \times H^2 + e \times D^2 + f \times H \times D \quad (5.2)$$

여기서, PM_{10} : 추정된 PM_{10} 값 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

H : PM_{10} 측정 높이 (m)

D : PM_{10} 측정 거리 (m)

각 계수들 및 R^2 값과 RMSE값은 Table 5.2에 정리하였다.

Table 5.2 Coefficient a, b, c, d, e, f and R^2 , RMSE of equation for height and distance

Cases	a	b	c	d	e	f	R^2	RMSE
Wind Velocity 0.0m/s	65114.4	-59487.1	-19125.6	20239.6	1616.1	6584.3	0.941	2961.8

Fig 5.13 은 식 (5.2) 로 추정된 높이별 거리별 비산먼지 확산값과 추정값의 관계 그래프이다.

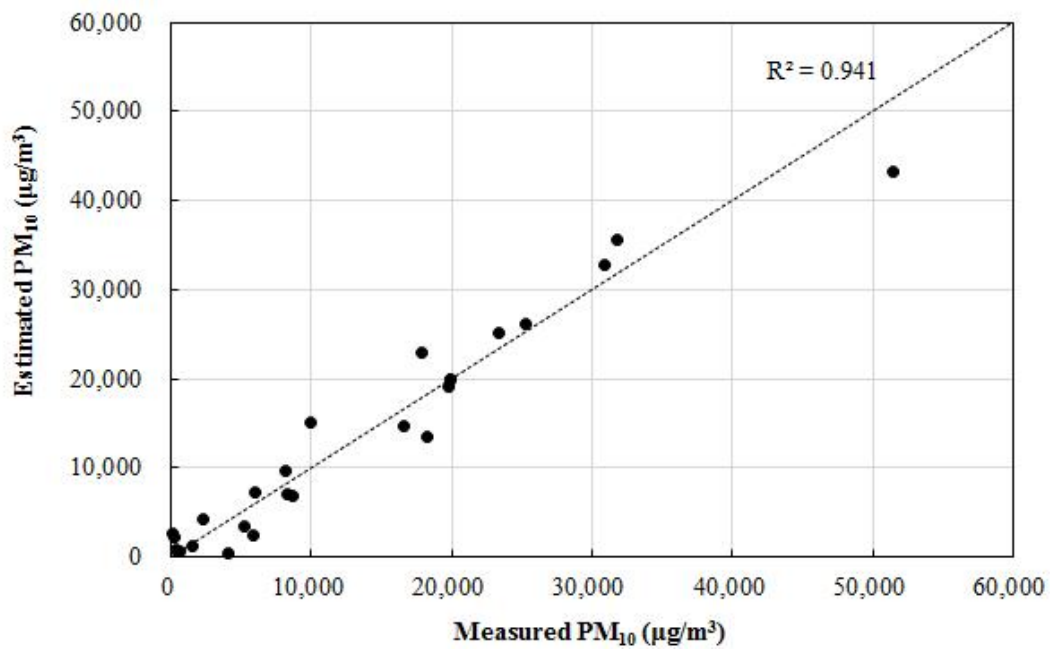
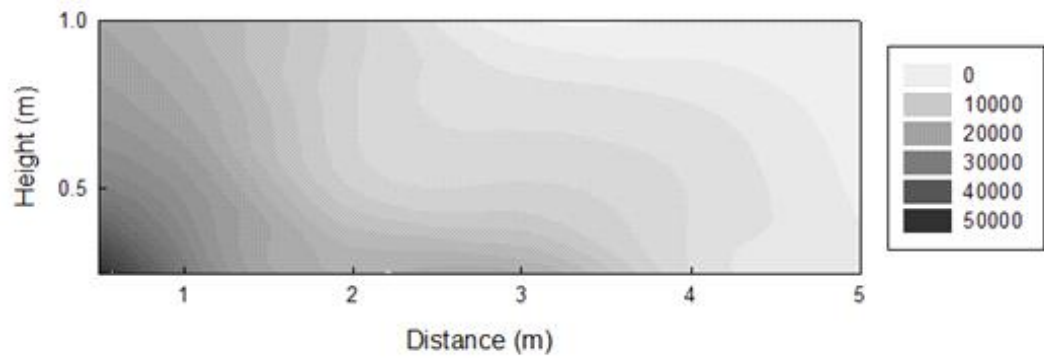


Fig. 5.13 Relationship between the measured and estimated PM₁₀ about measuring height, distance at 0.0m/s

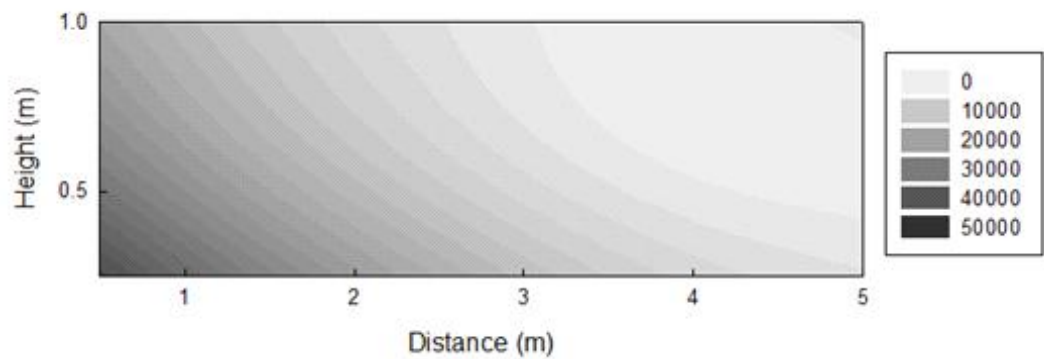
회귀식 작성 결과 풍속이 0.0m/s일 때, R^2 값이 0.941로 상대적으로 높은 값을 보여 비산먼지 측정 높이 및 거리에 따라 비산먼지 측정량을

추정할 수 있을 것이라 판단된다.

Fig. 5.14 는 풍속이 0.0m/s일 때 높이, 거리에 따른 비산먼지 측정값과 식 (5.2) 를 통해 추정된 비산먼지 추정값을 표현한 그래프이다.



(a) Measured PM₁₀



(b) Estimated PM₁₀

Fig. 5.14 Contour graph about measured and estimated PM₁₀ at 0.0m/s

측정값 및 회귀식으로 추정된 그래프 비교 결과 비슷한 양상을 보이는 것으로 나타났다. 따라서 식 (5.2) 를 통해 풍속이 존재하지 않을 경우 낙하 충격에 의한 비산먼지 확산 특성 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

5.2.2. 낙하 추 무게 변화에 따른 높이, 거리별 비산먼지 확산 특성

낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산 특성을 분석하기 위해 낙하 추의 무게 및 측정 높이, 측정 거리를 변화시키면서 PM_{10} 값을 측정하였다. Fig 5.15 ~ 5.17은 각각 낙하 추의 무게가 3.0kg, 5.0kg, 7.0kg일 때의 높이별, 거리별 비산먼지 발생량 측정값이다.

모든 무게에서 측정 높이 및 거리가 증가할수록 PM_{10} 값이 감소하는 경향을 보이는 것으로 판단된다. 낙하 추 무게가 증가할수록 PM_{10} 값의 감소폭은 증가하는 것으로 나타났다.

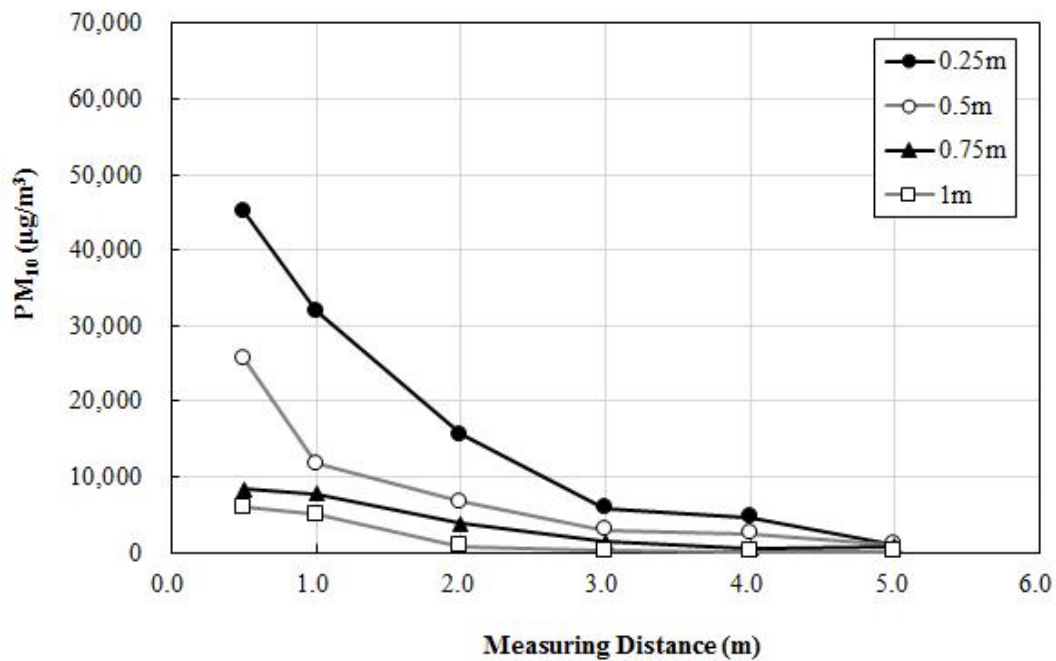


Fig. 5.15 Relationship between PM_{10} and measuring height, distance at 3kg

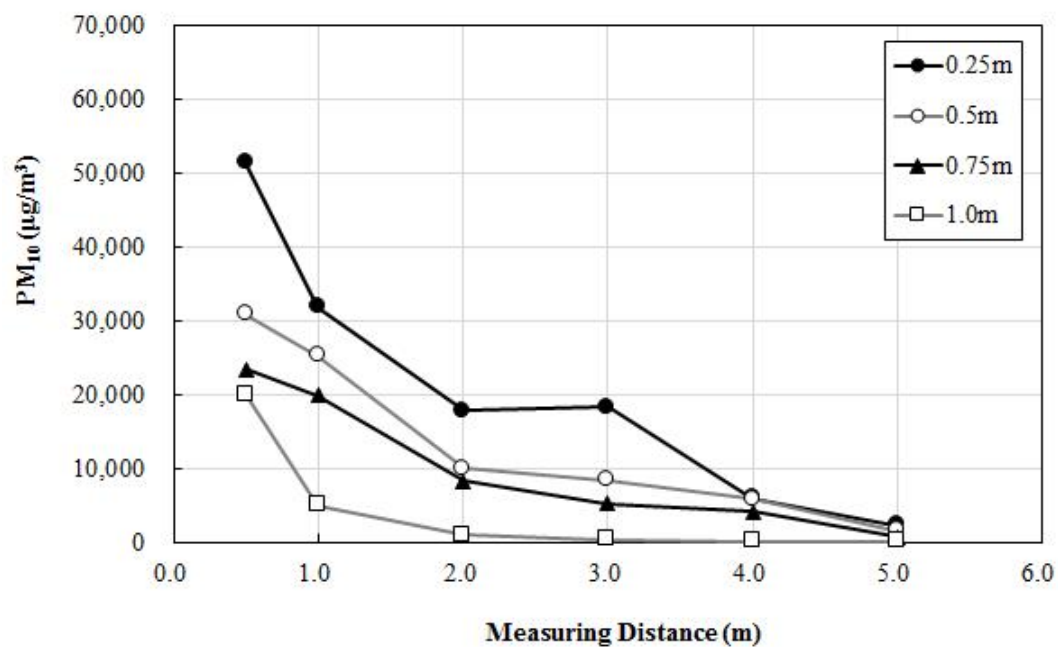


Fig. 5.16 Relationship between PM₁₀ and measuring height, distance at 5kg

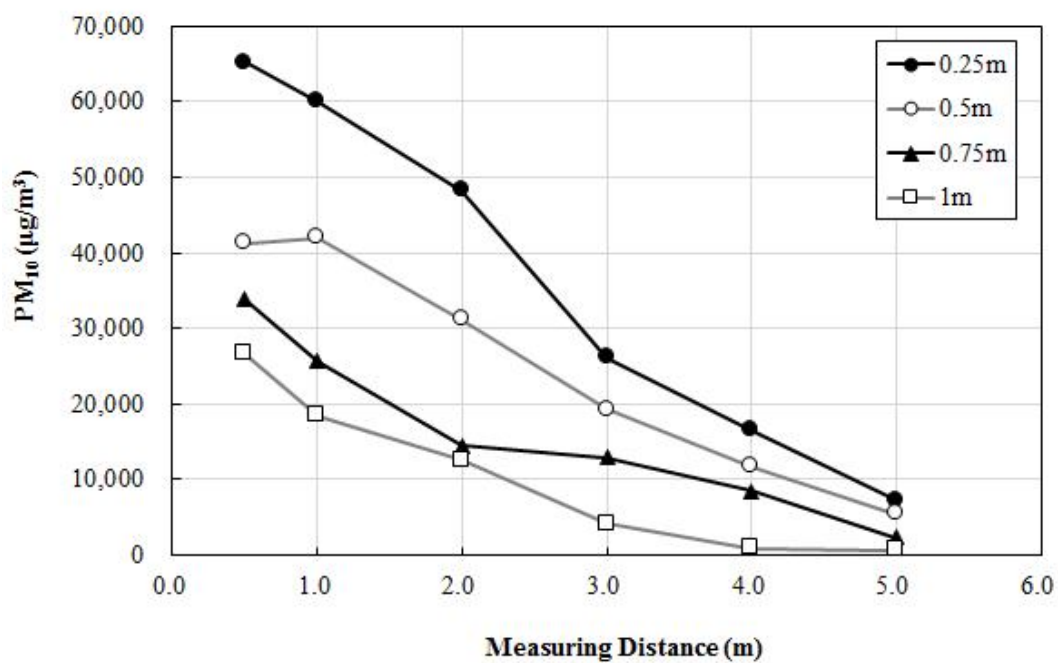


Fig. 5.17 Relationship between PM₁₀ and measuring height, distance at 7kg

낙하 추 무게 변화 및 측정 높이에 따른 비산먼지 측정값 변화는 Fig. 5.18 과 같다. 측정 거리는 나무판 중심거리에서 0.50m 떨어진 지점이다.

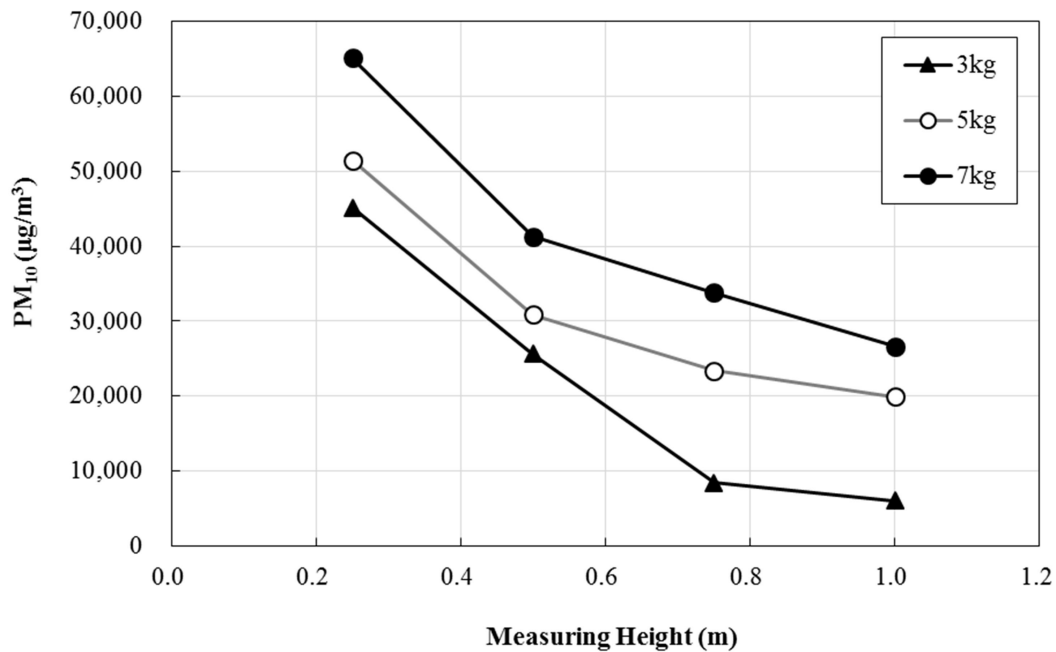


Fig. 5.18 Relationship between PM₁₀ and weight, measuring height

낙하 추 무게가 3.0, 5.0, 7.0kg 으로 증가할수록 동일 측정 높이에서의 PM₁₀ 값이 증가하는 경향을 보였으며, 측정 높이가 증가함에 따라 PM₁₀ 값이 감소하는 경향을 보이는 것을 나타냈다. 높이 변화에 따른 비산먼지 측정값의 감소폭은 무게가 감소할수록 증가하는 경향을 보이는 것으로 나타났다. 이는 낙하 추 무게 증가에 따라 추에 가해지는 운동 에너지가 증가할수록 충격에 의해 비산되는 먼지의 운동에너지가 증가하여 비산먼지가 상대적으로 높은 지점까지 도달하여 PM₁₀ 의 농도가 증가하는 경향을 보이는 것으로 판단된다.

Fig. 5.19 는 낙하 추 무게와 측정 거리에 따른 PM₁₀ 측정값이다. 측

정 높이는 1.0m이다.

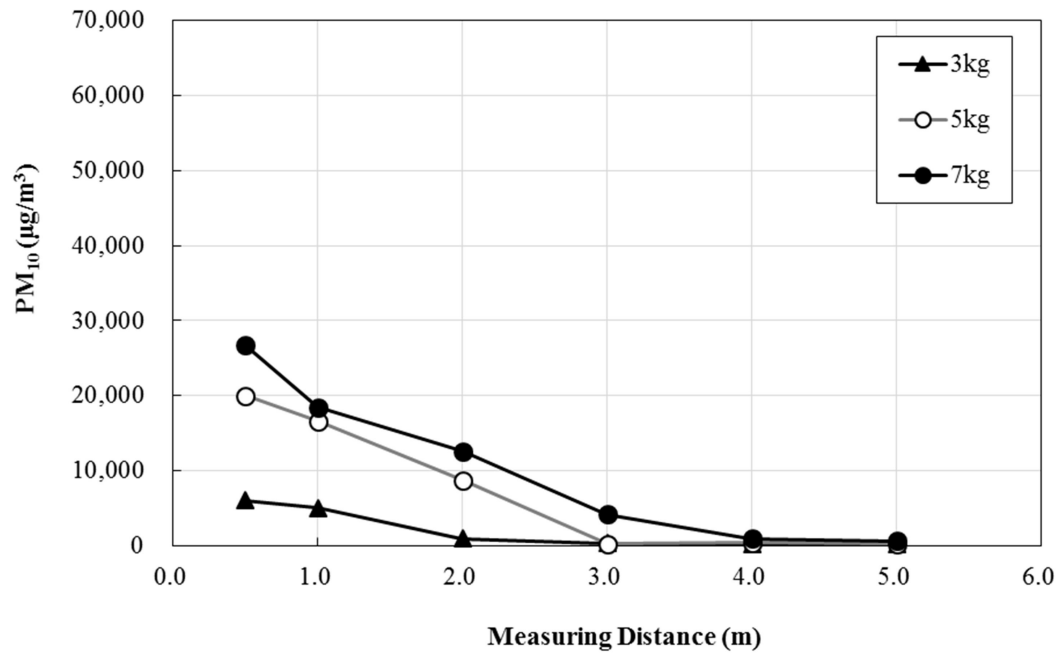


Fig. 5.19 Relationship between PM₁₀ and weight, measuring distance

측정 높이 변화 결과와 마찬가지로 측정 거리가 증가할수록 비산먼지 측정값은 감소하는 것으로 나타났다. 낙하 추의 무게가 3.0kg일 때 측정 거리가 4.0m, 5.0m일 때와 5.0kg일 때 5.0m 거리에서의 측정값은 배경먼지 농도와 비슷한 값을 나타냈다.

낙하 추 무게 변화에 따른 비산먼지 확산 특성 분석 결과 측정 높이 및 거리 변화에 따라 비산먼지는 가우시안 분포를 통해 확산하는 것으로 판단된다.

5.2.3. 운동에너지 및 측정 높이, 거리에 따른 비산먼지 확산량 추정

모든 무게에서 높이 및 거리에 따라 가우시안 모델에 의해 비산먼지가 확산하는 것으로 판단됨에 따라 운동에너지 및 높이, 거리에 따른 비산먼지 측정값 추정을 위해 최소자승법을 이용하여 회귀식을 작성하였으며, 일반식은 식 (5.3) 과 같다.

$$PM_{10} = a + b \times E + c \times H + d \times D + e \times E \cdot H + f \times H \cdot D + g \times H \cdot E + h \times E^2 + i \times H^2 + j \times D^2 \quad (5.3)$$

여기서, PM_{10} : 추정된 PM_{10} 값 ($\mu\text{m}/\text{m}^3$)

E : 낙하 추의 운동에너지 ($\text{kg} \cdot (\text{m}/\text{s})^2$)

H : PM_{10} 측정 높이 (m)

D : PM_{10} 측정 거리 (m)

각 계수들 및 R^2 값과 RMSE값은 Table 5.3 에 정리하였다.

Table 5.3 Coefficient a, b, c, d, e, f, g, h, i, j and R^2 , RMSE of equation for kinetic energy, height and distance

Cases	a	b	c	d	e	f
Effect on kinetic energy, height and distance	41764.4	411.5	-59872.1	-13766.7	-195.8	4572.2
	g	h	i	j	R^2	RMSE
	-55.2	5.0	24753.9	1300.3	0.949	3431.9

Fig 5.20 은 식 (5.3) 으로 추정한 운동에너지, 측정 높이 및 거리별 비산먼지 확산값과 추정값의 관계 그래프이다.

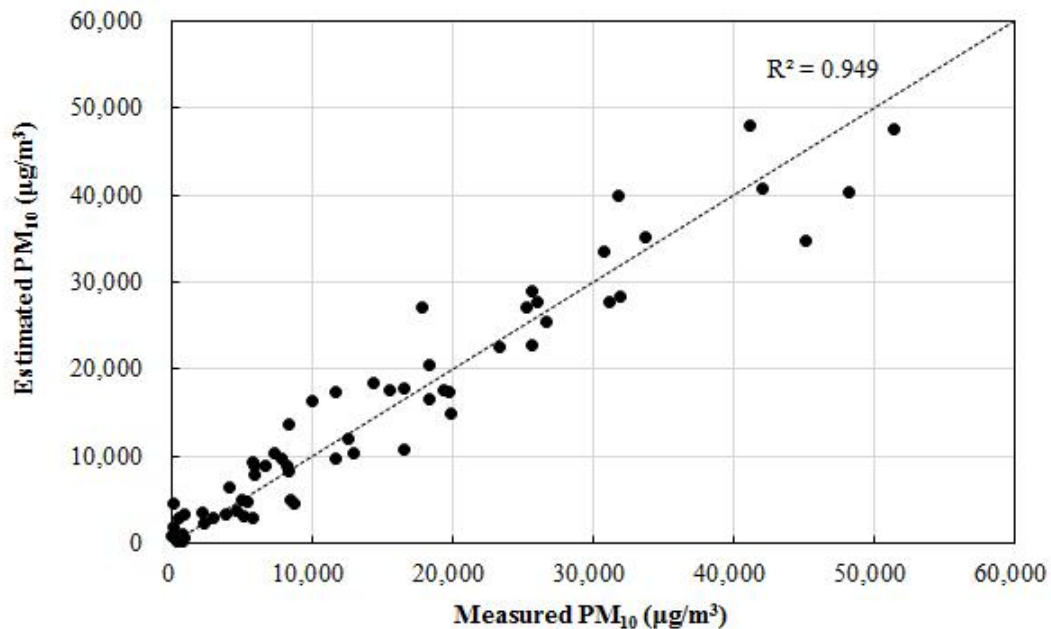


Fig. 5.20 Relationship between the measured and estimated PM₁₀ about kinetic energy, measuring height and distance

비산먼지 측정값과 운동에너지, 측정 거리 및 높이를 통한 추정값의 비교 결과 R^2 값이 0.949로 상대적으로 높은 값을 보여 운동에너지, 측정 높이 및 거리에 따라 비산먼지 측정량을 추정할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 비산먼지 측정값은 최소 약 $100\mu\text{m}/\text{m}^3$ 에서 최대 약 $65,000\mu\text{m}/\text{m}^3$ 으로 상당히 범위가 넓다. 오차를 최소화하여 회귀식을 작성하는 최소자승법에서는 추정값이 음수가 되는 현상이 발생하게 된다. 이에 따라 비산먼지 발생량이 상대적으로 작은 범위에서 비산먼지 발생량을 추정하기 위해서는 비산먼지 발생량이 상대적으로 작은 범위에서의 추정식을 구분해서 작성해야 할 것으로 판단된다. 따라서 비산먼지 발생량이 $3,000\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이하일 경우의 회귀식을 작성하여 비산먼지 발생량과 추정

량을 비교하였다. 일반식은 식 (5.3) 과 같으며, 각 계수들 및 R^2 값과 RMSE값은 Table 5.4 에 정리하였다.

Table 5.4 Coefficient a, b, c, d, e, f, g, h, i, j and R^2 , RMSE of equation for kinetic energy, height and distance below $3,000\mu\text{m}/\text{m}^3$

Cases	a	b	c	d	e	f
Effect on kinetic energy, height and distance below $3000\mu\text{m}/\text{m}^3$	12570.1	25.0	-8183.7	-3177.4	-89.6	2147.7
	g	h	i	j	R^2	RMSE
	-7.9	1.2	-923.2	156.4	0.884	240.2

Fig 5.21 은 식 (5.3) 및 Table 5.4 의 계수로 추정된 비산먼지 추정값 $3000\mu\text{m}/\text{m}^3$ 이하일 경우에서의 운동에너지, 측정 높이 및 거리별 비산먼지 확산값과 추정값의 관계 그래프이다.

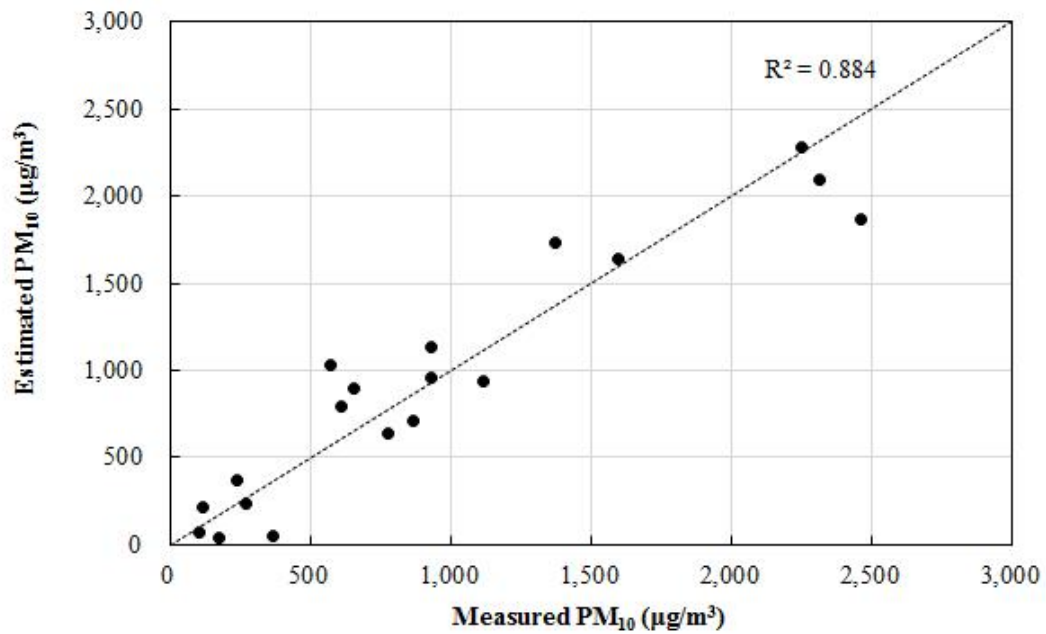


Fig. 5.21 Relationship between the measured and estimated PM₁₀ about kinetic energy, measuring height and distance below 3,000μm/m³

비산먼지 측정값과 운동에너지, 측정 거리 및 높이를 통한 추정값의 비교 결과 R^2 값이 0.884로 상대적으로 높은 값을 보여 비산먼지 추정값이 3,000μm/m³ 이하인 경우에서도 운동에너지, 측정 높이 및 거리에 따라 비산먼지 측정량을 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

제 6 장 결론

본 연구는 흙에서 인간의 활동에 의한 비산먼지 발생 특성 분석을 위해 낙하에 의한 운동에너지 및 낙하 추의 크기를 변화시키면서 비산먼지 발생량을 측정하여 외부 충격에 의한 비산먼지 발생에 영향을 주는 요인을 분석하였다. 또한 낙하 충격을 통해 발생한 비산 먼지의 확산 특성을 분석하기 위해 낙하에 의해 발생한 비산먼지에 대한 측정 높이, 측정 거리 변화 및 풍속 변화에 따른 비산먼지 발생량을 측정하여 외부 충격에 의한 비산먼지 확산 특성을 분석하였다.

낙하 높이가 증가함에 따라 PM_{10} 발생량이 증가하는 것으로 나타났다. 같은 높이에서의 경우 일정 무게까지는 무게가 증가할수록 비산먼지 발생량도 증가 하는 경향을 보이는 것으로 나타났으나, 일정 무게 이상에서는 무게 증가로 인한 운동에너지 증가에도 불구하고 비산먼지 발생량이 증가하지 않았다. 운동에너지 증가에 의해 발생하는 비산먼지 증가에 한계치가 있는 것으로 나타났다,

운동에너지와 추 둘레 변화와 PM_{10} 과의 경향은 한계둘레까지는 둘레 증가에 따라 PM_{10} 이 증가하는 양상을 보이지만 그 이후로는 둘레 증가에 따라 비산먼지 발생량이 감소하는 경향을 나타냈다. 운동에너지/낙하둘레 비율의 경우 각 무게별 비율이 $0.7 \text{ kg} \cdot (\text{m/s})^2/\text{cm}$ 정도로 비슷한 값을 나타냈다. 운동에너지 증가에 따라 단위둘레당 운동에너지가 증가하면서 비산먼지 발생량이 증가하는 경향이 나타나지만, 단위둘레당 운동에너지가 한계 이상으로 증가하게 되면 풍화토 표면이 관입되는 현상이 발생하게 된다. 이로 인해 풍화토 표면의 입자 반발에 의한 비산먼지 발생량이 감소하는 것으로 판단된다.

한계둘레를 기준으로 한계둘레 미만일 경우 회귀식의 R^2 값은 0.784, 한계둘레 이상일 경우 회귀식의 R^2 값은 0.743으로 나타나 상대적으로

높은 경향성을 보였다. 한계둘레 이상일 경우 측정값과 추정값이 상대적으로 적은 오차로 먼지 발생량을 예측할 수 있는 것으로 나타나 운동에너지와 낙하 둘레를 통해 PM_{10} 을 추정할 수 있을 것이라 판단된다.

외부 충격에 의한 비산먼지 확산 특성을 분석하기 위해 풍속, 및 측정 거리, 높이를 변화시키면서 비산먼지 발생량을 측정한 결과 풍속이 0.0m/s일 경우, PM_{10} 측정값은 거리에 측정 높이와 거리가 증가할수록 감소하는 것으로 나타났으며, 높이, 거리에 따라 이중 가우시안 모델에 의해 확산하는 것으로 판단된다. 풍속이 1.0m/s일 경우 비산먼지가 상대적으로 0.25m 보다 낮은 높이로 확산되는 것으로 나타났다. 풍속이 2.9m/s일 경우에는 풍속이 1.0m/s일 경우보다 상대적으로 측정 높이에 따른 PM_{10} 측정값 차이가 작은 것으로 나타났다. 이는 상대적으로 높은 풍속으로 인해 상대적으로 고른 범위에서 확산이 이루어진 것으로 판단되며, 풍속이 존재할 경우 거리에 대한 영향은 크지 않은 것으로 나타났다.

운동에너지 변화에 따른 비산먼지 확산량을 측정한 결과 추 낙하 무게가 증가할수록 측정 높이, 측정 거리에 따른 PM_{10} 이 증가하는 것으로 나타났다. 이는 낙하 추 무게 증가에 따라 추에 가해지는 운동에너지가 증가할수록 충격에 의해 비산되는 먼지의 운동에너지가 증가하여 비산 먼지가 상대적으로 높은 지점 및 먼 지점까지 도달하기 때문으로 판단된다. 운동에너지, 측정 높이 및 거리에 따른 비산먼지 발생량 추정 회귀식 작성 결과 R^2 값이 0.949로 운동에너지, 측정 높이 및 거리에 따라 비산먼지 측정량을 추정할 수 있을 것이라 판단된다. 하지만 넓은 범위의 비산먼지 측정값에 의해 추정값이 음수가 되는 현상이 발생하게 되어 비산먼지 발생량이 $3,000\mu m/m^3$ 이하일 경우의 회귀식을 구분하여 작성하였다. $3,000\mu m/m^3$ 이하의 회귀식의 경우 R^2 값이 0.884로 비산먼지 발생량이 상대적으로 작은 경우에도 운동에너지, 측정 높이 및 거리에 따른 비산먼지 측정값 추정이 가능할 것이라 판단된다.

본 연구는 외부 충격에 의한 흙에서의 비산먼지 발생 및 확산에 대한

기초연구로, 추후 연구를 통해 외부 충격량 및 풍화토의 종류 및 토양 입도 함수비 등의 변화에 의한 비산먼지 및 풍식 발생량 산정량을 추정하여 흙에서의 비산먼지 및 풍식 발생 억제 및 대책 마련에 도움이 될 것이라 판단된다.

참고문헌

1. 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호, 2005. 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 31(4): 301-308.
2. 김성중, 2001. 대형점오염원의 대기질 환경영향평가 기법에 관한 연구. 건국대학교 석사학위논문.
3. 김용표, 2006. 서울의 미세먼지로 인한 대기 오염. 한국대기환경학회지, 22(5): 535-553.
4. 김태완, 손영환, 민슬기, 이인복, 홍세운, 김민영, 2013. 소형 풍동을 이용한 토양의 풍식 가능 입경 분석. 한국농공학회논문집, 55(6): 127-133.
5. 김현재, 안준영, 문광주, 김종춘, 김정수, 이민도, 이석조, 전하은, 오준, 최진수, 박승명, 박종성, 이상욱, Arun Kumar Reddy Loka, 신은상, 2010. PM_{2.5}의 물리·화학적 특성에 관한 연구. 환경관리학회지, 16(2): 81-88.
6. 박해우, 조영민, 2013. 미세먼지 관리기준과 발생원별 관리방안. 한국 대기환경학회지, 29(4): 486-503.
7. 박기철, 이상준, 2000. 바람에 의한 야적모래입자의 비산에 관한 실험적 연구. 대한기계학회 2000년도 춘계 학술대회 논문집B: 740-745.
8. 윤배근, 서종범, 김영식, 최원준, 김윤수, 오광중, 2009. 매립공사 시 비산먼지 발생량 및 AERMOD를 이용한 영향예측에 관한 연구. 한국환경보건학회지, 35(4): 304-314
9. 이내현, 김윤신, 2000. 대규모 공사 시 비산먼지 산정 및 확산분석에 관한 연구. 환경영향평가, 9(3): 249-255.
10. 이용진, 2007. 미세먼지 입자크기에 따른 급성사망 영향과 경제적 손실 비용. 연세대학교 박사학위논문.
11. 최원준, 조기철, 이은용, 나하영, 이순규, 오광중, 2006. 신항만 해사 매립 공사시 비산먼지 발생량 산정 및 주변영향 평가. 환경영향평가,

- 15(4): 237-247.
12. 최재원, 이영수, 김재진, 2010. 기상 조건과 매립 조건이 비산 먼지 발생에 미치는 영향. 한국환경과학회지, 19(11): 1423-1436.
 13. 한국조경학회, 2013. 조경설계기준.
 14. 환경부, 2013, 미세먼지 브로셔.
 15. 환경부, 2014, 대기오염공정시험기준.
 16. 황현섭, 이인복, 신명호, 홍세운, 서일환, 유재인, 이승기, 2009. 간척지 인근 농경지에서의 비산 및 부유먼지 확산 모니터링(I) : 군산 모니터링. 한국농공학회논문집, 50(4): 39-50.
 17. Bitog, J. P., I. B. Lee, M. H. Shin, S. W. Hong, H. S. Hwang, I. H. Seo, J. I. Yoo, K. S. Kwon, Y. H. Kim and J. W. Han, 2009. Numerical simulation of an array of fences in Saemangeum reclaimed land. Atmospheric environment, 43(30): 4612-4621.
 18. Bolte, K., P. Hartmann, and H. Fleige, 2011. Determination of critical soil water content and matric potential for wind erosion. Journal of Soils Sediments 11(2): 209-220.
 19. Etyemezian, V. Kuhns, H. Gillies, J. Chow, J. Hendrickson, K. McGown, M. Pitchford, M., 2003. Vehicle-based road dust emission measurement (III):: effect of speed, traffic volume, location, and season on PM10 road dust emissions in the Treasure Valley, ID. Atmospheric Environment, 37(32): 4583-4593.
 20. Etyemezian, V. Nikolich, G. Ahonen, S. Pitchford, M. Sweeney, M. Purcell, R. Gillies, J. Kuhns, H., 2007. The Portable in situ wind erosion laboratory (PI-SWERL): A new method to measure PM₁₀ windblown dust properties and potential for emissions. Atmospheric environment, 41(18): 3789-3796.
 21. Fister, W. and J. B. Ries, 2009. Wind erosion in the central Ebro Basin under changing land use management. Field experiments

- with a portable wind tunnel. *Journal of arid environments* 73(11): 996-1004.
22. Gillies, A., V. Etyemezian, H. Kuhns, D. Nikolic and D. Gillette, 2005, Effect of vehicle characteristics on unpaved road dust emissions, *Atmospheric environment*, 39(13): 2341-2347.
 23. Hong, S. W., I. B. Lee, I. H. Seo, K. S. Kwon, T. W. Kim and Y. H. Son, 2014. Measurement and prediction of soil erosion in dry field using portable wind tunnel. *Biosystems engineering*, 118: 68-83.
 24. Kuhns, H., V. Etyemezian, M. Green, K. Hendrickson, M. McGown, K. Barton and M. Pitchford, 2003. Vehicle-based road dust emission measurement II - Effect of precipitation, wintertime road sanding, and street sweepers on inferred PM₁₀ emission potentials from paved and unpaved roads. *Atmospheric environment*, 37(32): 4573-4582.
 25. Liu, L., J. Wang, X. Li, Y. Liu, W. Ta and H. Peng, 1998. Determination of erodible particles on cultivated soils by wind tunnel simulation. *Chinese science bulletin*, 43(19): 1646-1651.
 26. Lyles, L., 1988. Basic Wind Erosion Process. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 22(23): 91-101.
 27. Pinnick, R., G. Fernandez, B. Hinds, C. Bruce, R. Schaefer and J. Pendleton, 1985, Dust generated by vehicular traffic on unpaved roadways sizes and infrared extinction, *Aerosol Science and Technology*, 4(1): 99-121.
 28. Saxton, K., D. Chandler, L. Stetler, B. Lamb, C. Claiborn, and B. H. Lee, 2000. Wind erosion and fugitive dust fluxes on agricultural lands in the Pacific Northwest. *Transactions of the ASAE*, 43(3): 623-630.

29. Seo, I. H., I. B. Lee, M. H. Shin, G. Y. Lee, H. S. Hwang, S.W. Hong, J. P. Bitog, J. I. Yoo, K. S. Kwon, and Y. H. Kim,, 2010. Numerical Prediction of Fugitive Dust Dispersion on Reclaimed Land in Korea. Transactions of the ASABE, 53(3): 891-902.
30. Wang, J., A. Hiscox, D. Miller, T. Meyer, and T. Sammis, 2008. A dynamic lagrangian, field-scale model of dust dispersion from agriculture tilling operations. Transactions of the ASABE, 51(5): 1763-1774.
31. Williams, D. M., Shukla, and J. Ross, 2008. Particulate matter emission by a vehicle running on unpaved road, Atmospheric Environment, 42(16): 3899-3905.
32. Zobeck, T., 1991. Soil Properties Affecting Wind Erosion. Journal of Soil and Water Conservation, 46(2): 112-118.
33. Zhang, C., X. Zou, J. Gong, L. Liu, Y. Liu, 2004. Aerodynamic roughness of cultivated soil and its influences on soil erosion by wind in a wind tunnel, Soil and Tillage Research, 75(1): 53-59.

Abstract

Estimation of Dust Emission by Impact on Weathering Soil and Analysis of Dispersion Characteristic

Seulgi, Min

Major in Rural Systems Engineering

Department of Landscape Architecture and Rural Systems Engineering

The Graduate School

Seoul National University

The particulate matter is known to be one of the most harmful substances in various air pollutants. Humans, as well as crops and livestock are known to adversely affect. But little effort in researching for dust emission characteristic causes by external impact by human activity and dispersion characteristic in accordance with height, distance. So, This study focused dust emission characteristic by drop impact on soil changing kinetic energy and size of drop weight and estimated dust emission by kinetic energy and weight size for quantitative analysis of dust generated by impact. And analyzed dust dispersion characteristic by measuring dust emission generated by drop impact in accordance with height, distance and changing wind velocity.

In the results, dust emission was increase as kinetic energy of drop weight was increase. Also, in accordance with increasing drop

perimeter, dust emission was increase, but it reaches limit perimeter dust emission was decreased as perimeter increasing, It was shown that different dispersion characteristic if the wind velocity is exist or not. In case of not existing wind velocity, dust was dispersed according to Gaussian diffusion model. Dust dispersion was increased in accordance with increasing kinetic energy of drop weight.

This study is fundamental research of analysis about dust emission caused external impact. Though further study, the factor about external impact will be analyzed on dust emission and wind erosion.

**Keywords : Weathering soil, Drop impact, Dust emission,
Dust dispersion, PM₁₀**

Student Number : 2012-23363